

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FRANCISCO PEDRO SOARES DE LIMA

UM MODELO MATEMÁTICO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS
BASEADO EM UMA ABORDAGEM PONTO-A-RETA

CURITIBA

2018

FRANCISCO PEDRO SOARES DE LIMA

UM MODELO MATEMÁTICO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS
BASEADO EM UMA ABORDAGEM PONTO-A-RETA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Área de Concentração em Fotogrametria, departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

L732m Lima, Francisco Pedro Soares de
 Um modelo matemático para mosaicagem de imagens digitais baseado em uma abordagem ponto-a-reta /
 Francisco Pedro Soares de Lima. – Curitiba, 2018.
 58 p. : il. color.

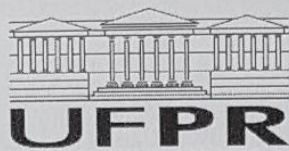
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geodésicas, 2018.

Orientador: Daniel Rodrigues dos Santos.

1. Mosaicagem. 2. Modelo matemático. 3. Imagens digitais. 4. Ponto-a-reta. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Santos, Daniel Rodrigues dos. III. Título.

CDD: 526.9

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



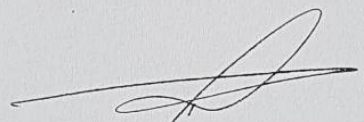
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS

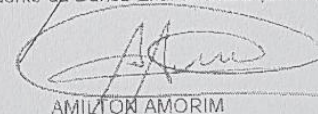
TERMO DE APROVAÇÃO

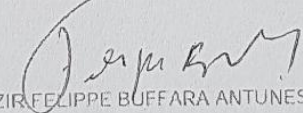
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FRANCISCO PEDRO SOARES DE LIMA** intitulada: **UM MODELO MATEMÁTICO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS BASEADO EM UMA ABORDAGEM PONTO-A-RETA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 25 de Abril de 2018.


DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


AMILTON AMORIM
Avaliador Externo (UNESP/PP)


ALZIR FELIPE BUFFARA ANTUNES
Avaliador Interno (UFPR)

Dedico esta dissertação a minha mãe Ermelinda Valentim, a memória do meu pai Pedro Miguel Soares de Lima, minha esposa Odavias José Xerinda de Lima, meus filhos Pedro Patico Francisco de Lima, Tainara Ermelinda Francisco de Lima e Eliel Francisco de Lima, aos meus irmãos Joana da Conceição Francisco Lima, Artur Pedro Soares de Lima e Manuela Pedro Soares de Lima, que me apoiaram durante todo tempo em que estive desenvolvendo este trabalho.

Também dedico ao meu orientador Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos, por sua competência e atenção.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, bênção e proteção.

Ao Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos, pela orientação, apoio, incentivos, confiança, acolhimento e principalmente pela amizade.

Ao professor Jorge Antônio Silva Centeno, pela confiança e acolhimento.

Aos amigos e colegas Miguel Ribeiro Muguio, André Fenias Moiane, Caisse Amisse, Helder Da Conceição Tomas Manhiça, pela amizade, companheirismo, pelo incentivo, apoio e carinho que me foi dado, pela colaboração na realização deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Júlio, Leonel Biff, Nadson, Elizeu, Jaqueline, Kauê, Fabiano, Pedrosa, Alex, Carla, Nicolas, Mário, Ilish, pela amizade, companheirismo e pela colaboração recebida durante o curso. E aos demais colegas que de uma forma contribuíram no desenvolvimento do trabalho.

A Moçambique, meu país; em particular Infatec, meu local de trabalho, por conceder bolsa de estudo.

RESUMO

Neste trabalho é proposto um modelo matemático para mosaicagem de imagens digitais. A principal característica do modelo proposto é sua abordagem ponto-a-reta, que consiste em alinhar localmente de pares de imagens digitais. Os principais pontos a serem discutidos neste trabalho são: 1) extração de linhas retas; 2) Estimativa dos parâmetros de transformação entre pares de imagens digitais; 3) Mosaicagem digital. Primeiramente, são definidas janelas de recorte para a imagem de referência e para a imagem de pesquisa. Em seguida, linhas retas são extraídas empregando uma ferramenta de detecção e extração de linhas retas. Para cada janela de recorte é obtido um agrupamento ordenado de linhas retas. As correspondências entre o agrupamento de linhas retas são manualmente estabelecidas. Uma transformação matemática que mapeia cada ponto médio da linha reta extraída na imagem de referência numa linha reta correspondente na imagem de pesquisa é proposto, para estimativa dos parâmetros de transformação. Finalmente, os valores dos parâmetros de transformação estimados são introduzidos em uma matriz de construção. O resultado é um mosaico com uma transformação geométrica coincidente de feições entre as imagens.

Palavras-chaves: Mosaicagem. Modelo matemático. Imagens digitais. Ponto-a-reta.

ABSTRACT

In this work a mathematical model for mosaicking of digital images is proposed. The main characteristic of the proposed model is its approach to point-to-straight line, which consists in aligning locally pairs of digital images. The main points to be discussed in this study are: 1) extraction of straight lines; 2) estimation of transformation parameters between pairs of digital images; 3) Digital mosaicking. Firstly, cutting windows for reference and research images are defined. Then, straight lines are extracted using a tool for detection and extraction of straight lines. For each cutting window is obtained an orderly grouping of straight lines. The correspondences between the straight lines grouping are manually established. A mathematical transformation that maps each mid-point of the straight line extracted in the reference image into a corresponding straight line in the research image is proposed, to estimate the transformation parameters. And, finally, the values of the estimated transformation parameters are introduced in a construction matrix. The result is a mosaic with a matching geometric transformation of features between the images.

Key words: Mosaicking. Mathematical model. Digital images. Point-to-straight line.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DE UMA IMAGEM DIGITAL BIDIMENSIONAL	20
FIGURA 2 - MOSAICAGEM PELO MÉTODO DIRETO	22
FIGURA 3 - MOSAICAGEM PELO MÉTODO INDIRETO	22
FIGURA 4 - INTERPOLAÇÃO DE NÍVEL DE CINZA COM BASE NO CONCEITO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	24
FIGURA 5 - MÁSCARAS PARA CÁLCULO DO FILTRO DA MÉDIA: (a) 3X3, (b) 5X5 E (c) 7X7	25
FIGURA 6 - UMA REGIÃO 3X3 DE UMA IMAGEM	27
FIGURA 7 - MÁSCARAS UTILIZADAS NO OPERADOR DE SOBEL	29
FIGURA 8 - SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS. (a) RESULTADO OBTIDO COM OPERADOR SOBEL; (b) RESULTADO DA LIMIAÇÃO POR OTSU; (c) SUPRESSÃO NÃO-MÁXIMA APLICADA NA IMAGEM	31
FIGURA 9 - RPA EMPREGADO NA COLETA DAS IMAGENS	33
FIGURA 10 - ARQUITETURA DO MÉTODO PROPOSTO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS	34
FIGURA 11 - ETAPAS DO PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS	35
FIGURA 12 - PARES DE IMAGENS DO CENÁRIO I. (a) (c) (e) IMAGENS DE REFERÊNCIA PARA OS EXPERIMENTOS 1, 2 E 3. ; (b) (d) (f) IMAGENS DE PESQUISA PARA OS EXPERIMENTOS 1, 2 E 3	41
FIGURA 13 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO 1. (b) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO 2	44
FIGURA 14 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO 3. (b) RECORTE DO MOSAICO E AMPLIAÇÃO DAS REGIÕES	45
FIGURA 15 - PARES DE IMAGENS DO CENÁRIO II. (a) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 4. (b) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 5. (c) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 6	46
FIGURA 16 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 4. (b) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO	

EXPERIMENTO 5. (c) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 6.....	47
FIGURA 17 - PARES DE IMAGENS DO CENÁRIO III. (a) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 7. (b) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 8	48
FIGURA 18 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 7. (b) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 8.....	49
FIGURA 19 - PARES DE IMAGENS. (a) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1. (b) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2.....	50
FIGURA 20 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO DE STEGMANAN. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1. (b) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2. (c) RECORTE DO MOSAICO E AMPLIAÇÃO DAS REGIÕES DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2.....	51
FIGURA 21 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1. (b) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2. (c) RECORTE DO MOSAICO E AMPLIAÇÃO DAS REGIÕES DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1.....	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE ALINHAMENTO LOCAL DE IMAGENS DIGITAIS	19
TABELA 2 - COORDENADAS DOS PONTOS E OS PARÂMETROS DAS LINHAS RETAS CORRESPONDENTES COLETADAS NAS IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA.....	42
TABELA 3 - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ESTIMADOS PELO MODELO PROPOSTO.....	43

LISTA DE SIGLAS

2D	- Bidimensional
E	- Experiência
FFT	- Fast Fourier Transform
FOV	- Field Of View
GSD	- Ground Sample Distance
GTM	- Graph transformation Matching
MDT	- Modelo Digital de Terreno
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
MOPS	- Multi-Scale Oriented Patches
MST	- Minimum Spanning tree
RANSAC	- Random Sample Consensus
RGB	- Red Green Blue
RPA	- Remotely Piloted Airborne
SIFT	- Scale Invariant Feature Transform
SURF	- Speed Up Robust Features

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	ESTADO DA ARTE EM MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS	17
2.2	IMAGENS DIGITAIS.....	19
2.3	GERAÇÃO DE MOSAICOS DIGITAIS	21
2.3.1	Interpolação de níveis de cinza	23
2.4	DETECÇÃO E EXTRAÇÃO DE LINHAS RETAS	25
2.4.1	Suavização de imagem.....	25
2.4.2	Segmentação de imagem.....	28
2.4.3	Vetorização dos pixels de borda.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODO	33
3.1	MATERIAIS	33
3.2	MÉTODO PROPOSTO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS	34
3.2.1	Pré-processamento dos dados	35
3.2.2	Alinhamento local de pares de imagens digitais	37
3.2.3	Mosaicagem de imagens digitais.....	39
4	EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na última década, câmeras digitais têm sido amplamente empregadas para coleta de imagens aéreas, terrestres e de satélite. A partir de imagens digitais pode-se, por exemplo, construir mosaicos digitais e modelos de realidade virtual, monitorar desastres naturais, realizar estudos meteorológicos e de viabilidade de linhas de transmissão, gerar ortofotos digitais, produzir cartas topográficas, entre outros.

O emprego de mosaicos digitais por diversas vezes, se mostrou imprescindível para tomada de decisões estratégicas, principalmente, para estudos de grandes extensões territoriais. Basicamente, um mosaico digital é um produto fotogramétrico derivado da concatenação de imagens digitais tomadas com sobreposição longitudinal e lateral. A técnica empregada para geração de mosaicos digitais é conhecida como mosaicagem de imagens e pode ser dividida em duas etapas (Xia et al., 2017): 1) Alinhamento local dos pares de imagens digitais; e 2) Alinhamento global do conjunto de pares de imagens digitais.

A primeira etapa consiste em estimar os parâmetros de transformação (uma rotação θ , duas translações Δx , Δy e dois fatores de escala μ_x, μ_y) entre cada par de imagens usando uma função matemática 2D $f(x, y)$ que mapeia cada ponto da imagem de referência $I(x, y)$ a um ponto correspondente na imagem de pesquisa $I'(x, y)$. A segunda etapa consiste em refinar a estimativa dos parâmetros de transformação e materializar um sistema referencial único para o mosaico digital. Neste trabalho, será dado ênfase apenas para a primeira etapa, isto é, a técnica de alinhamento local dos pares de imagens digitais.

O alinhamento local de pares de imagens digitais é tarefa crucial para a construção de mosaicos digitais, além de influenciar diretamente a qualidade do produto gerado. Geralmente, as abordagens empregadas para estimativa dos parâmetros de transformação de pares de imagens digitais são agrupadas em modelos de correspondência por área e modelos de correspondência por feições. De acordo com Schenk (1999) a correspondência por área compara a distribuição de níveis de cinza de uma subimagem $S(x, y)$ com sua correspondente em $I'(x, y)$ e pode ser feito usando funções matemáticas que determinam seu coeficiente de correlação

ou através da minimização da diferença de níveis de cinza entre $S(x, y)$ e uma janela de correlação em $I'(x, y)$. Para Ali et al. (2016), o alto custo computacional da técnica de correspondência por área inviabiliza seu emprego em tarefas de mosaicagem de imagens. Já as abordagens de correspondência baseadas em feições, também conhecida como correspondência por característica ou correspondência estrutural, são técnicas que realizam o processamento localmente, ou seja, em regiões de pixels de borda e de canto. O objetivo deste processo é encontrar o melhor mapeamento entre descritores locais, sendo necessárias três subtarefas, a saber: A) Detecção e extração de feições (pontos ou linhas retas); B) Construção dos descritores relacionais; e C) Estabelecimento das correspondências. O SIFT é o algoritmo mais empregado para as tarefas de detecção e extração de feições, construção de descritores relacionais e estabelecimento de suas correspondências, que se têm notícias e foi proposto em 2004 por David Lowe.

Já o modelo matemático adotado para mapear as primitivas entre as imagens depende da característica do método de correspondência empregado. Por exemplo, se feições pontuais são detectadas e extraídas para encontrar o melhor mapeamento entre seus descritores locais o método de correspondência usado é baseado em uma abordagem ponto-a-ponto.

Enquanto as feições pontuais são largamente empregadas em tarefas de construção de mosaicos digitais por serem abundantes e não se degeneram ao serem projetadas (Galo, 2004), as linhas retas estão presentes em ambientes modificados pelo homem, são perenes, não requer correspondência ponto-a-ponto, são fáceis de serem extraídas em imagens digitais e são menos suscetíveis a falsos positivos no estabelecimento de suas correspondências (Dal Poz et al., 1996).

Neste trabalho, será investigado um modelo matemático para mosaicagem de imagens digitais baseado em uma abordagem ponto-a-reta. A principal contribuição do método proposto é o desenvolvimento de uma transformação matemática que mapeia cada ponto médio da linha reta extraída na imagem de referência $I(x, y)$ a uma linha reta correspondente na imagem de pesquisa $I'(x, y)$, para estimativa dos parâmetros de transformação (alinhamento local).

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Este trabalho trata do alinhamento local de mosaico de imagens digitais. Um passo chave na geração de mosaicos de imagens é produzir um mosaico digital de correspondência perfeita do ponto de vista geométrico. Durante o processo de aquisição das informações, o sensor produz erros sistemáticos e aleatórios que influenciam os processos de medida das observações. O resultado é um mosaico de baixa qualidade geométrica e eivado de inconsistências.

Neste caso, é importante o desenvolvimento de um método de alinhamento local para mosaicagem de imagens digitais. Portanto, a justificativa do trabalho em questão pode ser evidenciada devido à relevância científica que a Comissão III – “Image orientation” (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) têm dada ao tema de mosaicagem de imagens, ao potencial de emprego de mosaicos digitais em aplicações civis e militares, e ao ineditismo do modelo de transformação proposto que é baseado em uma abordagem ponto-a-reta, empregado para a estimativa dos parâmetros de transformação entre pares de imagens digitais.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar e avaliar um método de alinhamento local para produzir mosaicos de imagens digitais consistentes. Como objetivos específicos visam-se:

- Estudar e aplicar um fluxograma de detecção e extração de linhas retas em imagens digitais;

- Desenvolver um modelo de transformação baseado em abordagem ponto-a-reta para estimar os parâmetros de transformação entre pares de imagens digitais;

- Avaliar os resultados obtidos tomando como referência o método direto (método convencional) para geração de mosaicos digitais.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do conteúdo necessário para a geração de mosaicos digitais. Primeiramente são explicados os conceitos fundamentais e as etapas envolvidas no

processo de obtenção de imagens digitais. Em seguida é feita uma explanação sobre o método de geração de mosaicos. Na sequência, são descritas etapas para geração de mosaico digital como, métodos direto e indireto, interpolação, extração de linhas retas. No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos. No Capítulo 4 são apresentados os experimentos e discussões dos resultados em torno do método proposto. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os tópicos relevantes ao processo de geração de mosaico digital abordando os conceitos básicos de imagens digitais, o estado da arte, os conceitos de imagem digital, métodos de geração de mosaicos, interpolação de níveis de cinza, detecção e extração de linhas retas.

2.1 ESTADO DA ARTE EM MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS

Basicamente, os métodos existentes de geração de mosaicos digitais são proeminentemente baseados em abordagens ponto-a-ponto. Neste trabalho os métodos serão agrupados em duas principais categorias, como segue:

(1). Baseado em características (ou feições pontuais): Xing et al. (2012) apresentaram um modelo de otimização em duas etapas para mosaicagem de imagens sequenciais adquiridas por uma plataforma RPA. Os autores usaram o algoritmo SURF para detecção e extração de feições pontuais, construir os descritores relacionais, estabelecer as correspondências e o filtro de Kalman para estimar os parâmetros de transformação. Li et al. (2012) propuseram uma estratégia para registro e mosaicagem de dados RPA. Os autores empregaram o algoritmo SIFT para o processo de correspondência e o algoritmo RANSAC para detectar e remover falsas correspondências de pontos. Os parâmetros de transformação foram estimados usando um ajustamento simultâneo de feixes de raios de luz perspectivos. A otimização dos valores de translação e rotação foi realizada com a aplicação do método de Levenberg-Marquardt. Gao e Jia (2007), desenvolveram método automático para mosaicagem de pares de imagens. Para determinação das primitivas utilizou-se o algoritmo de Harris e aplicou-se RANSAC para o refinamento das correspondências. Os parâmetros de transformação foram estimados utilizando método de Levenberg-Marquardt. Nemra et al. (2009) propuseram um método de mosaicagem de imagens de auto-resolução. Para descrição e detecção de primitivas utilizaram o algoritmo SIFT. Aplicaram uma transformação geométrica (transformação de similaridade associada a uma transformação afim) para a estimação dos valores de rotação e translação em uma abordagem ponto-a-ponto. Cho et al. (2003) também propuseram uma abordagem ponto-a-ponto para a resolução do mesmo problema. Os autores aplicaram o MMQ para estimação dos parâmetros de transformação entre

pares de imagens, utilizando dois modelos matemáticos: transformação afim e biquadrática. Para construção de mosaico digital, Islam e Kabir (2013) propuseram uma técnica de registro de imagens. Para esta tarefa, usaram operador de Sobel com um par de Kernel de convolução 3x3 para eliminar ruídos. Posteriormente, realizaram a segmentação de bordas de objetos presentes na imagem e as utilizaram como primitivas. A translação entre bordas homologas extraídas de diferentes imagens é estimada a partir do cálculo da distância de Hausdorff. Para eliminar as correspondências incorretas basearam-se na preservação da distância entre dois pontos da mesma imagem, após aplicação de uma transformação rígida. Xiao et al. (2005) propuseram um método de expansão de região para propagar de forma adaptável o alinhamento de regiões, aplicaram algoritmo de base longa para calcular um conjunto de correspondência e um registro robusto foi alcançado com base em características de alto nível. Tian et al. (2003) propuseram um método para mosaicagem automática de imagens digitais baseado em pontos de interesse. Tian et al. (2018) propuseram um método de mosaicagem de imagens baseado na determinação de linha de costura, buscando área mínima de conexão e árvore de expansão mínima para eliminar a descontinuidade visual observável e melhorar a eficiência do tempo. Elibol et al. (2013) propuseram uma abordagem em grafos para mosaicagem de imagens, neste método as imagens são definidas como nós e as correspondências entre pares de imagens são definidas como arestas. Com utilização desta estrutura, o método é capaz de obter correspondências entre as imagens com um número reduzido de tentativas, diminuindo custo computacional. Xia et al. (2017) propuseram uma abordagem em grafos para o alinhamento globalmente consistente de imagens obtidas de cenas aproximadamente planares, através de análise topológica.

(2). Baseado em área: Berberibis et al. (2002) propuseram um algoritmo para registro de pares de imagens. A técnica consiste na aplicação do método de correlação cruzada para estimativa dos valores de translação e rotação. Em um processo iterativo o algoritmo refina os parâmetros de transformação até que os pares de imagens sejam concatenados em um mesmo referencial. Ghannam e Abbott (2013) propuseram um método baseado em correlação cruzada combinada com a técnica da média de pixels, em que cada pixel no mosaico visa extrair seu valor em apenas uma única imagem. Patidar e Jain (2011) utilizaram um esquema baseado em correlação de imagens que opera no domínio de Fourier para encontrar os parâmetros de

transformação entre pares de imagens e empregá-los no processo de mosaicagem. A Tabela 1 mostra as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos supracitados.

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE ALINHAMENTO LOCAL DE IMAGENS DIGITAIS

Categorias	Vantagem	Desvantagem	Abordagem
(1)	<ul style="list-style-type: none"> - Correspondência precisa. - Fácil alinhamento. - Várias aplicações. - Computação simples, precisa e rápida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande consumo de memória. - Inconsistência geométrica. - Computacionalmente caro. - A precisão depende de grandes sobreposições. 	Ponto-a-ponto
(2)	<ul style="list-style-type: none"> - Regiões das imagens são usadas para estimar a correspondência. - Menos sensível a mudanças de iluminação e oclusão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultado incorreto. - Raramente usados. - Maior tempo computacional. - Inconsistência geométrica. 	Ponto-a-ponto

FONTE: O autor, (2018).

A seguir serão apresentados os conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

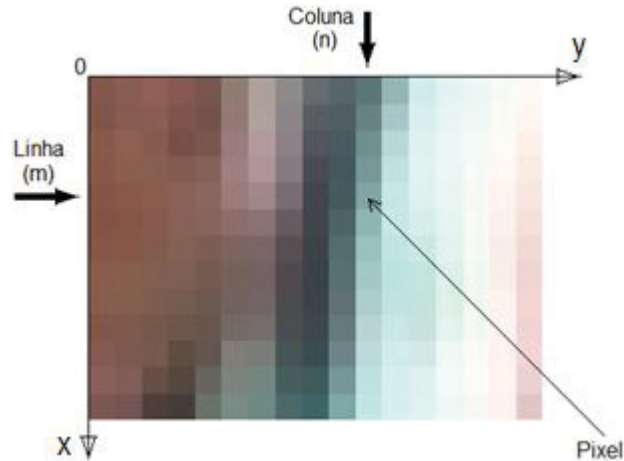
2.2 IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem pode ser determinada como uma função bidimensional, indicada por $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas espaciais, e f a amplitude em qualquer par de coordenadas (x, y) é proporcional ao brilho (ou nível de cinza) da imagem nesse ponto. Uma imagem digital é uma imagem $f(x, y)$ discretizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho e pode ser considerada como sendo uma matriz, cujos índices de linhas e colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz são chamados de pixels (Gonzalez e Woods, 2000).

A localização de um pixel em uma imagem bidimensional quanto a notação matricial é apresentada na figura 1. O sentido dos eixos x e y é por convenção segundo Gonzalez e Woods (2000). O índice m indica a posição da linha, na qual o pixel se depara, enquanto o índice n , indica a posição da coluna. O índice m varia de

o a $+\infty$ em relação a orientação do eixo y no sentido horizontal, enquanto o índice n varia de 0 a $+\infty$ em relação a orientação do eixo x no sentido vertical.

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DE UMA IMAGEM DIGITAL BIDIMENSIONAL



FONTE: O autor (2018).

Segundo Gonzalez e Woods, (2000) o termo imagem refere-se a uma intensidade luminosa bidimensional, denotado por $f(x,y)$. Como a luz é uma forma de energia, $f(x,y)$ deve ser positiva e finita, isto é (GONZALEZ e WOODS, 2000):

$$0 < f(x,y) < \infty \quad (1)$$

Para Gonzalez e Woods, (2000) a natureza básica de $f(x,y)$ pode ser caracterizada por dois componentes: a quantidade de luz que incide na cena observada e a quantidade de luz refletida pelos objetos na cena. Esses componentes são chamados iluminação e refletância, e são representados por $i(x,y)$ e $r(x,y)$, respectivamente. O produto das funções $i(x,y)$ e $r(x,y)$ resulta $f(x,y)$ (GONZALEZ e WOODS, 2000):

$$f(x,y) = i(x,y) r(x,y) \quad (2)$$

Onde $0 < i(x,y) < \infty$ e $0 < r(x,y) < 1$, sendo $i(x,y)$ determinada pela fonte de iluminação, enquanto $r(x,y)$ dependente das características dos objeto na cena.

2.3 GERAÇÃO DE MOSAICOS DIGITAIS

Basicamente, há dois métodos de geração de mosaicos digitais, isto é, o método direto e o método indireto (Hasegawa e Junior, 2004). O método direto estima os parâmetros de transformação entre pares de imagens digitais (alinhamento local) usando o modelo de transformação afim geral no plano, tal como apresentada na Equação (3). A transformação afim geral no plano tem como propriedade básica manter o paralelismo entre os sistemas referenciais. Segundo os autores, o método direto transfere as cores dos pixels da imagem original para o mosaico a ser preenchido.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde: $a_1, a_2, a_3, a_4, \Delta X$ e ΔY são os parâmetros de transformação; x, y são as coordenadas no sistema referencial digital da imagem de referência e X, Y são as coordenadas no sistema referencial digital da imagem de pesquisa. Segundo Arruda Junior (2002), a transformação inversa é aplicada para relacionar o sistema da imagem original com o sistema do mosaico e realizar o transporte dos níveis de brilho dos pixels da imagem para o mosaico, segundo a equação (4):

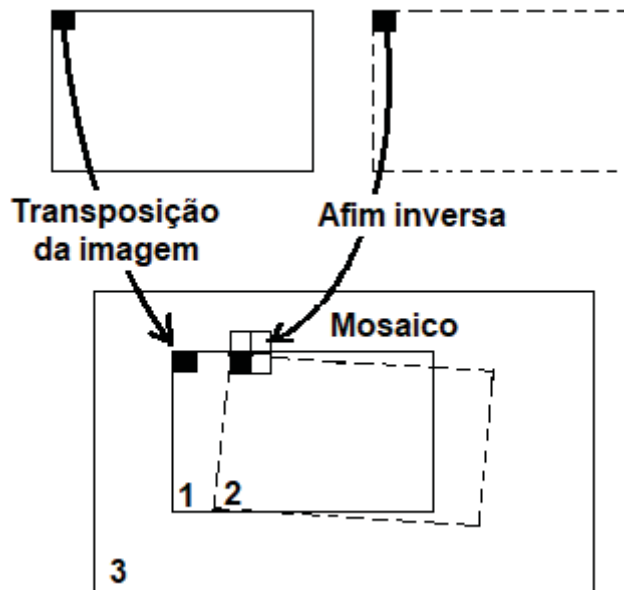
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X - \Delta X \\ Y - \Delta Y \end{bmatrix} \quad (4)$$

Segundo Hasegawa e Junior, (2004) quando são conhecidos os coeficientes de transformação, a função de mapeamento pode ser usada para relacionar um ponto na imagem de referência com seu ponto correspondente na imagem a ser transformada.

Além da estimativa dos parâmetros de transformação afim geral no plano também é necessário realizar um processo de reamostragem dos pixels, uma vez que as imagens digitais têm valores de pixels definidos apenas no domínio discreto. Neste caso, os valores de coordenadas resultantes da transformação devem ser

arredondados. Este procedimento pode influenciar no mapeamento de todos os pixels no mosaico, fazendo com que apareçam pontos brancos dispostos de forma regular na imagem resultante, isto é, sem valores de cinza atribuídos (Hasegawa e Junior, 2004). A representação do método direto é mostrada na Figura 2.

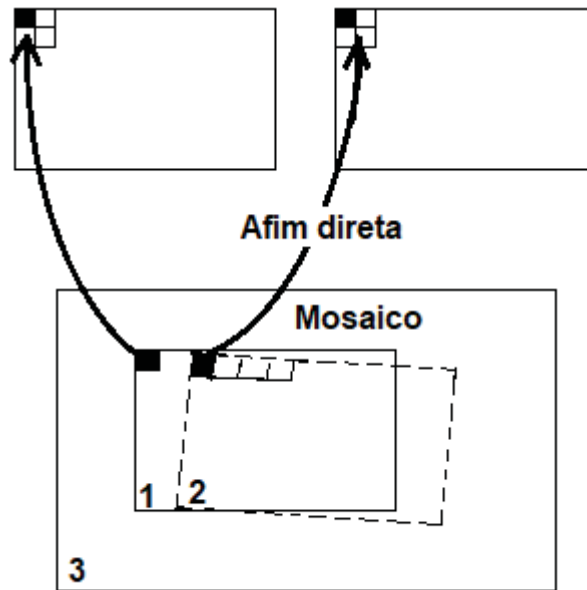
FIGURA 2 - MOSAICAGEM PELO MÉTODO DIRETO



FONTE: Adaptada de ARRUDA JUNIOR (2002).

Já no método indireto (Hasegawa e Junior, 2004) a transferência dos níveis de brilho é realizada da imagem a ser transformada para o mosaico (inicialmente representado por uma imagem vazia). As cores dos pixels, nessa imagem vazia, serão definidas a partir das duas imagens a serem transformadas, no seu modo direto. A primeira imagem será copiada integralmente no mosaico e a segunda será mapeada no mosaico a partir da transformação afim geral no plano, empregando a Equação (4).

FIGURA 3 - MOSAICAGEM PELO MÉTODO INDIRETO



FONTE: Adaptada de ARRUDA JUNIOR (2002).

As coordenadas são determinadas pela transformação afim geral no plano e a busca da sua posição é realizada no sistema referencial da imagem de entrada, podendo não coincidir com o centro de um pixel, sendo necessária interpolação por vizinho mais próximo. A representação do método indireto é mostrada na Figura 3.

2.3.1 Interpolação de níveis de cinza

Segundo Gonzalez e Woods (2000) dependendo dos coeficientes c_i , as equações:

$$\hat{x} = c_1x + c_2y + c_3xy + c_4 \quad (5)$$

e

$$\hat{y} = c_5x + c_6y + c_7xy + c_8 \quad (6)$$

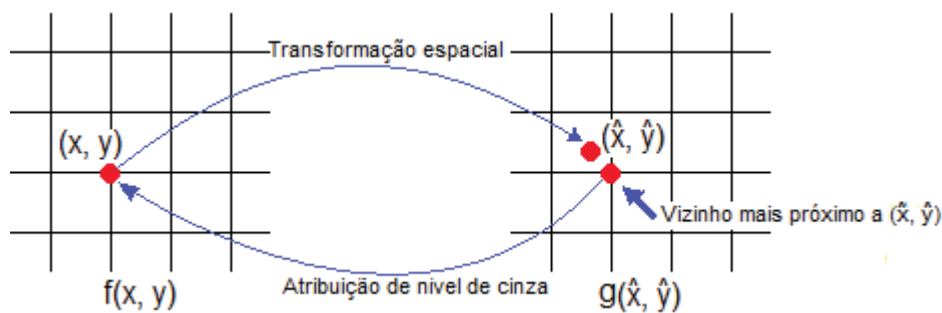
podem produzir valores não inteiros para \hat{x} e \hat{y} .

Como a imagem g é digital, seus valores de pixel são definidos apenas em coordenadas inteiras. Assim, usando-se valores não inteiros para \hat{x} e \hat{y} causa um mapeamento em posições de g para as quais os níveis de cinza não estão definidos. A estimação dos valores dos níveis de cinza naquelas posições, baseada apenas nos

valores dos pixels nas posições de coordenadas inteiras, é assim necessária. A técnica usada para isso é denominada interpolação de níveis de cinza.

Para Gonzalez e Woods (2000) o esquema mais simples para interpolação de níveis de cinza é baseado numa abordagem de vizinho mais próximo. A Figura 4 mostra o mapeamento das coordenadas inteiras (x, y) em coordenadas fracionárias (\hat{x}, \hat{y}) nos termos das Equações (5) e (6), a seleção da coordenada inteira mais próxima vizinha de (\hat{x}, \hat{y}) e a atribuição do nível de cinza deste vizinho mais próximo ao pixel posicionado em (x, y) . Embora a interpolação do vizinho mais próximo seja simples de ser implementado, este método tem a desvantagem de produzir artefatos indesejáveis, tal como distorção de bordas retas em imagens de resolução fina.

FIGURA 4 - INTERPOLAÇÃO DE NÍVEL DE CINZA COM BASE NO CONCEITO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO



FONTE: Adaptada de GONZALEZ; WOODS (2000).

Gonzalez e Woods (2000) resultados mais suaves podem ser obtidos usando-se técnicas mais sofisticadas, tal como a interpolação por convolução cúbica, que fixa uma superfície do tipo $(\sin x)/x$ através de um número muito maior de vizinhos, com a finalidade de se obter uma estimativa suave do nível de cinza naquele ponto desejado. Entretanto, do ponto de vista computacional, essa técnica é custosa e um ajuste razoável é usar uma abordagem de interpolação bilinear que usa os níveis de cinza dos quatro vizinhos mais próximos. O valor do nível de cinza de (\hat{x}, \hat{y}) , denotado por $v(\hat{x}, \hat{y})$, pode ser interpolado a partir dos seus vizinhos, usando a relação (Gonzalez e Woods, 2000):

$$v(\hat{x}, \hat{y}) = a\hat{x} + b\hat{y} + c\hat{x}\hat{y} + d \quad (7)$$

Na Equação (07) os quatro coeficientes são determinados a partir de quatro equações com quatro incógnitas, que podem ser escritas usando-se os quatro vizinhos de (\hat{x}, \hat{y}) . Uma vez que esses coeficientes tenham sido determinados, $v(\hat{x}, \hat{y})$ é calculado e seu valor é atribuído à posição em $f(x, y)$, que produziu o mapeamento na posição (\hat{x}, \hat{y}) .

2.4 DETECÇÃO E EXTRAÇÃO DE LINHAS RETAS

A tarefa de detecção e extração de linhas retas pode ser dividida em quatro etapas, a saber: a) Suavização da imagem; b) Segmentação da imagem; c) Afinamento de bordas; e d) Vetorização dos pixels de borda.

2.4.1 Suavização de imagem

A etapa de suavização de imagens consiste em atenuar os efeitos de ruído e excesso de detalhes presentes em imagens digitais, sendo os principais filtros utilizados: filtro da média; filtro da mediana; e suavização com preservação de bordas e cantos (Marques Filho e Neto, 1999).

Segundo Gonzalez e Woods (2000) a forma mais simples de implementar um filtro é construir uma máscara com todos seus coeficientes igual a 1, dividindo o resultado da convolução por um fator de normalização, como se pode perceber na Figura 5. Um filtro com esta característica é denominado filtro da média e uma das principais limitações está na sua incapacidade de preservar bordas e detalhes finos da imagem.

FIGURA 5 - MÁSCARAS PARA CÁLCULO DO FILTRO DA MÉDIA: (a) 3X3, (b) 5X5 E (c) 7X7

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{49} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 \text{(a)} & \text{(b)} & \text{(c)}
 \end{array}$$

FONTE: Adaptada de MARQUES FILHO; FILHO (1999).

De acordo com Gonzalez e Woods (2000) no filtro da mediana, o nível de cinza de cada pixel é substituído pela mediana dos níveis de cinza na vizinhança daquele pixel. No entanto, filtros por mediana não são lineares e seu desempenho é apenas satisfatório, quando comparado ao do filtro da média.

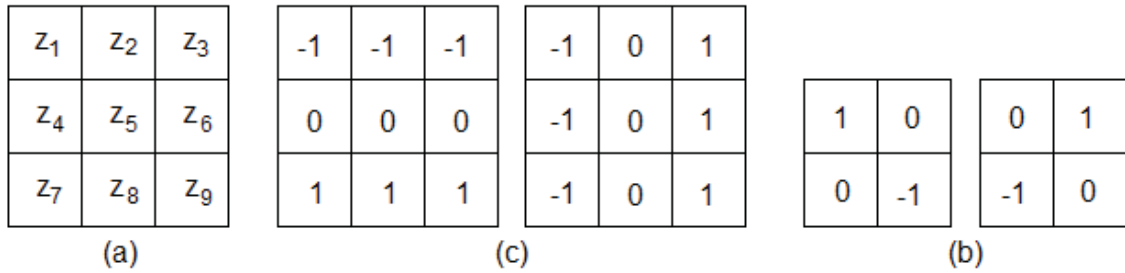
Segundo Gonzalez e Woods (2000) o método mais comum de diferenciação em aplicações de processamento de imagens é o gradiente. Para uma função $f(x, y)$ o gradiente de f nas coordenadas (x, y) é definida como o vetor:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A magnitude de ∇f é obtido da seguinte forma, a saber (Gonzalez e Woods, 2000):

$$mg(\nabla f) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

FIGURA 6 - UMA REGIÃO 3X3 DE UMA IMAGEM



FONTE: Adaptada de GONZALEZ; WOODS (2000).

Na Figura 6a, considerando que os z_1, \dots, z_9 denotam os valores de níveis de cinza, a Equação (11) pode ser aproximada no ponto z_5 de várias maneiras. A forma mais simples consiste em usar a diferença $(z_5 - z_8)$ na direção x e $(z_5 - z_6)$ na direção y combinada, como segue (Gonzalez e Woods, 2000):

$$\nabla f \approx \left[(z_5 - z_8)^2 + (z_5 - z_6)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

Ao invés de usar quadrados e raízes quadradas, pode-se obter resultados similares através do uso dos valores absolutos (Gonzalez e Woods, 2000):

$$\nabla f \approx |z_5 - z_8| + |z_5 - z_6| \quad (11)$$

Outra abordagem para aproximação da Equação (11) é usar as diferenças cruzadas (Gonzalez e Woods, 2000):

$$\nabla f \approx \left[(z_5 - z_9)^2 + (z_6 - z_8)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

ou, usar os valores absolutos:

$$\nabla f \approx |z_5 - z_9| + |z_6 - z_8| \quad (13)$$

As Equações (10)-(13) podem ser implementadas através do uso de máscaras de tamanho 2×2 , como ilustrado na Figura 6b, e essas máscaras são chamadas de

operadores de Roberts. Aproximação ainda no ponto z_5 , mas usando uma vizinhança 3×3 é dada por (Gonzalez e Woods, 2000):

$$\nabla f \approx |(z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3)| + |(z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7)| \quad (14)$$

As máscaras mostradas na Figura 6c, chamada de operadores de Prewitt, podem ser usadas para implementar a Equação (14). A diferença entre a terceira e a primeira coluna da região 3×3 aproxima a derivada na posição x e a diferença entre a terceira e a primeira linha aproxima a derivada na direção y (Gonzalez e Woods, 2000).

2.4.2 Segmentação de imagem

A etapa de segmentação de imagem é dividida em duas tarefas, isto é, a detecção de bordas e a limiarização de imagens. De acordo com Gonzalez e Woods (2000) borda é definida como uma descontinuidade abrupta dos valores de brilho numa imagem digital que descreve o contorno dos objetos. A borda é o elemento de maior interesse no processo de extração de feições.

Existem diversos operadores detectores de borda, tais como, operador Sobel, operador Laplaciano, operador de Prewitt, Nevatia e Babu, entre outros. Esses operadores formam um conjunto de métodos de pré-processamento utilizados para detectar mudanças abruptas na imagem. Tais mudanças podem ser descritas pelos gradientes nas direções em x e y (G_x e G_y), sendo sua direção e magnitude obtida como segue (Gonzalez e Woods, 2000):

$$magnitude_{G_x G_y} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (15)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (16)$$

De acordo com Gonzalez e Woods (2000) um dos operadores mais empregados para detecção de pixel de borda é o operador de Sobel. O operador Sobel

considera que os pixels mais próximos do centro da máscara possuem maior influência no gradiente, definindo assim máscaras com maior influência na região central. A Figura 7 mostra as máscaras de direção vertical e horizontal utilizadas pelo operador Sobel.

FIGURA 7 - MÁSCARAS UTILIZADAS NO OPERADOR DE SOBEL

	G_x				G_y		
	-1	0	1		-1	-2	-1
1/4	-2	0	2	1/4	0	0	0
	-1	0	1		1	2	1

FONTE: Adaptada de GONZALEZ; WOODS (2000).

Da aplicação dos operadores em G_x e G_y resultam os gradientes das bordas para as duas respectivas direções em x e y . Com G_x e G_y é possível calcular a magnitude da borda e sua direção.

Após a detecção de bordas na imagem digital, a etapa de limiarização é utilizada para eliminar pixels redundantes na borda detectada. Uma maneira de realizar esta tarefa é definir um limiar T de acordo com as características da imagem e classificar os pixels em duas classes (C_0 e C_1), isto é, objeto e fundo.

Uma técnica bastante utilizada, baseada na análise discriminante, é conhecida como OTSU. Com o método de OTSU, a determinação do limiar ótimo é feita considerando σ_B^2 e σ_T^2 como a variância de C_1 e a variância total entre as classes C_0 e C_1 (Sahoo et al., 1988). Desta forma, tem-se:

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{l-1} ip_i \quad (17)$$

$$\mu_t = \sum_{i=0}^t ip_i \quad (18)$$

sendo μ_T o desvio padrão total da ocorrência dos níveis de cinza na imagem, μ_t o desvio padrão da ocorrência dos níveis de cinza na imagem até o valor de limiar, i os níveis de cinza presentes na imagem e pi a probabilidade com que ocorrem estes níveis de cinza na imagem.

$$\varpi_0 = \sum_{i=0}^t pi \quad (19)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=0}^{l-1} (i - \mu_T)^2 pi \quad (20)$$

$$\sigma_B^2 = \varpi_0 \varpi_1 (\mu_1 \mu_0)^2 \quad (21)$$

sendo η a relação entre as variâncias dos pixels do fundo e total da imagem,

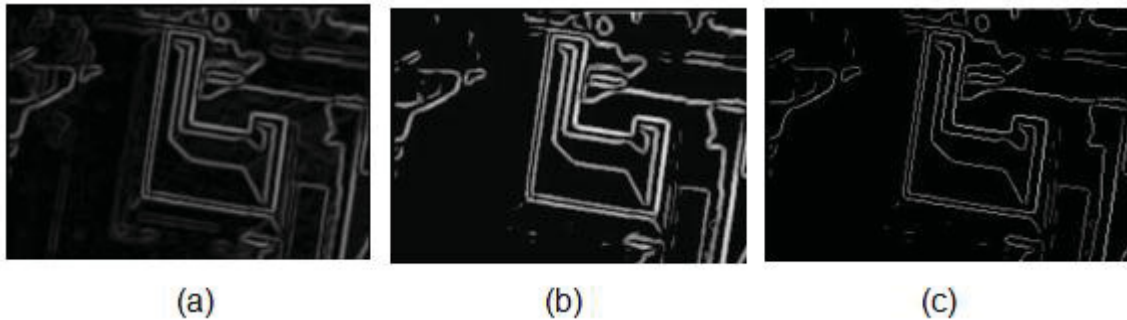
$$\varpi_1 = 1 - \varpi_0, \mu_1 = \frac{\mu_T - \mu_t}{\varpi_1}, \mu_0 = \frac{\mu_T}{\varpi_0}, \eta = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2}. \text{ Então, o limiar ótimo é determinado}$$

pela minimização da função η , ou seja, $t^* = \arg \min(\eta)$ (Sahho et al., 1988).

Com a detecção de bordas e limiarização um conjunto de pixels é obtido formando uma borda espessa. Desta maneira, é necessário realizar um processo de afinamento da borda. A etapa de afinamento de bordas consiste na eliminação dos pixels de borda redundantes. Isto pode ser feito através de uma análise da direção do pixel de borda que está sendo pesquisado. Como na detecção de bordas é obtido um conjunto de ângulos discretos com variações angulares, o método de supressão não-máxima elimina os pixels com direções perpendiculares à direção da borda, mantendo apenas aqueles com maior magnitude evitando, desta forma, inconsistências.

Por exemplo, pixels com direção de 90° ou 270° são comparados com seus vizinhos horizontais (direita e esquerda), enquanto os pixels com direção de 0° ou 180° são comparados com seus vizinhos verticais (acima e abaixo). Desta forma, é verificado se os pixels vizinhos possuem a mesma magnitude do pixel pesquisado. Em caso positivo são eliminados do processo. A Figura 6 mostra os resultados obtidos na etapa de segmentação de imagens.

FIGURA 8 - SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS. (a) RESULTADO OBTIDO COM OPERADOR SOBEL; (b) RESULTADO DA LIMIAZIZAÇÃO POR OTSU; (c) SUPRESSÃO NÃO-MÁXIMA APLICADA NA IMAGEM



FONTE: O autor (2018).

Na Figura 6a é apresentado o resultado do operador de bordas SOBEL. Como pode ser notado, apenas os pixels de bordas permanecem no processamento. Na Figura 6b, note que o resultado da limiarização OTSU mostra apenas as bordas consideradas significantes, enquanto as bordas insignificantes para o processo de extração de linhas, por exemplo, as quinas da fachada lateral da edificação, são eliminadas. Já na Figura 8c o resultado da supressão não-máxima é evidente em função do afinamento no segmento de bordas.

2.4.3 Vetorização dos pixels de borda

A conexão dos pixels de borda é necessária para agrupar pixels pertencentes à mesma borda e formar segmentos de linhas retas. Existem vários métodos que realizam o agrupamento dos pixels, tais como, a Transformada de *Hough*, *Scan&Label*, entre outros.

Venkateswar e Chellapa (1992) apresentaram o método *scan&label*. Neste método, a imagem digital é varrida da esquerda para a direita, de cima para baixo sendo verificada a vizinhança de cada pixel. Os pixels de borda são analisados pelo algoritmo e a eles são atribuídos rótulos de acordo com sua condição de análise. Ao primeiro pixel analisado é atribuído o rótulo de valor igual a 1, denominado de pixel rótulo. O pixel atual é aquele que está em processo de pesquisa, para que seja atribuído um rótulo. Caso seja encontrado algum vizinho, já rotulado do pixel atual, o último recebe o mesmo rótulo do primeiro. Ao final do processo obtém-se um conjunto de segmentos rotulados e atribuídos a eles suas respectivas magnitudes e direções.

Em seguida, deve ser realizado um ajustamento de segmentos retos. Artero (1999) apresentou um caso particular do ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, conhecido como regressão linear. Este método é utilizado em casos que os pixels pertencentes aos segmentos, são sempre ajustados por linhas retas. De acordo com Artero (1999) esta particularização permite a construção de um modelo mais simples de ser visualizado e ainda dispensa o uso de matrizes e vetores. Este modelo adota o conjunto de pixels definido por $S_{ij} = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ e a função g , escolhida como a função que mais se aproxima da função desconhecida que gerou a sequência S_{ij} . A solução é dada por:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{N}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{N}} \quad (22)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{N} - a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (23)$$

sendo N é o número de pixels do segmento de reta, a é o parâmetro angular da reta, b é o parâmetro linear da reta, x_i e y_i coordenadas do pixel, no sistema digital da imagem, que definem os pontos extremos de cada feição reta extraída.

A seguir serão apresentados os materiais e o método para a realização deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são os seguintes:

- 01 Microcomputador Processador Intel Core i7-3632QM @ 4Ghz, Memória 8 GB, HD: 1 TB; 01 Tela de 22", Sistema Operacional Linux, Placa gráfica NVIDIA GeForce. Recurso adquirido junto ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) pela concessão de auxílio financeiro referente ao projeto CNPq Universal no. 473567/2013-0;
- 01 RPA profissional multirotor (6 hélices) da marca DJI, modelo *Spreading Wings* S800 (Figura 7);
- 01 câmera digital de pequeno formato modelo Sony Nex-6, com resolução de 4912x3264 pixels, tamanho do quadro de 33,5mm x15,6mm e distância focal de 24mm;
- Linguagem de programação Matlab R2011; e
- Algoritmo de extração automática de linhas retas, desenvolvido por Artero (1999).

FIGURA 9 - RPA EMPREGADO NA COLETA DAS IMAGENS



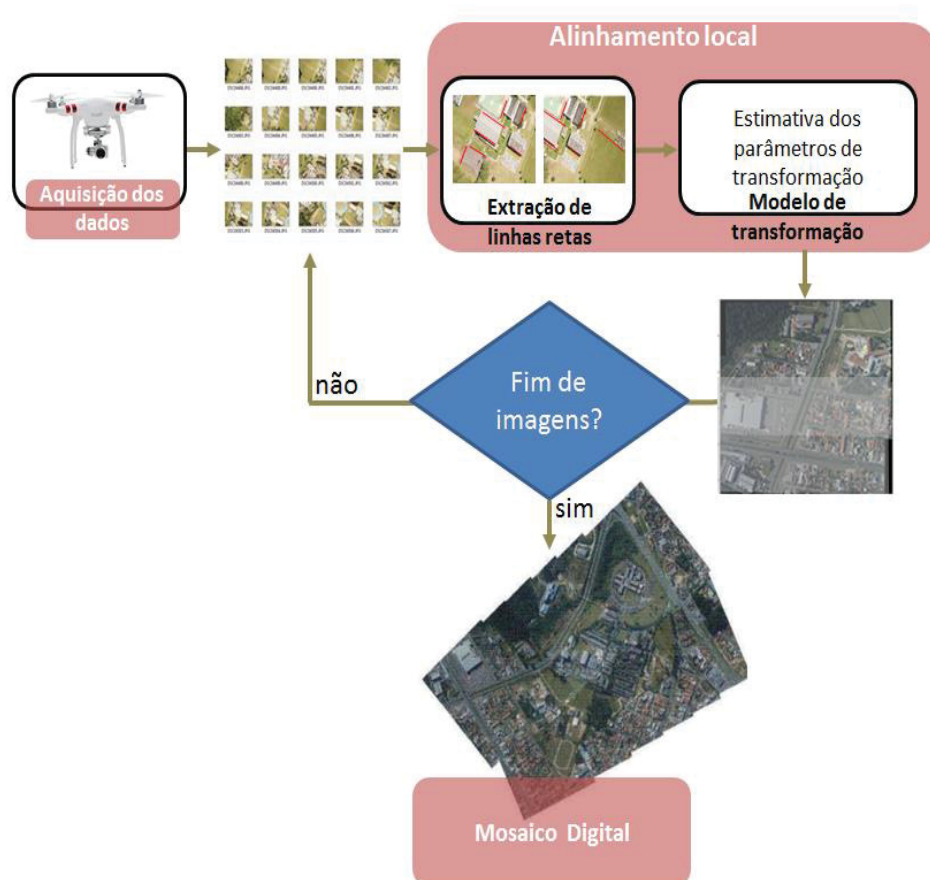
FONTE: O autor (2018).

A infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa é o Laboratório de Aquisição e Processamento de Dados Espaciais (LAPE), no Departamento de Geomática da UFPR. A seguir será apresentado o método proposto.

3.2 MÉTODO PROPOSTO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS

Este trabalho trata do alinhamento local de pares de imagens para mosaicagem de imagens digitais usando um modelo matemático baseado em uma abordagem ponto-a-reta. O alinhamento local consiste em alinhar pares de imagens digitais, consistindo de três etapas: 1) Extração de linhas retas em pares de imagens digitais e estabelecimento de suas correspondências; 2) Estimativa dos parâmetros de transformação entre pares de imagens; e 3) Geração do mosaico digital. A Figura 10 mostra a arquitetura das etapas envolvidas no desenvolvimento deste trabalho.

FIGURA 10 - ARQUITETURA DO MÉTODO PROPOSTO PARA MOSAICAGEM DE IMAGENS DIGITAIS



FONTE: O autor (2018).

De acordo com a Figura 10, primeiramente é necessário obter as imagens aéreas usando um sensor passivo embarcado em uma plataforma móvel aérea, tal como um RPA. Em seguida, para cada par de imagens digitais é aplicado o algoritmo de extração de feições retas e estabelecido suas correspondências. Posteriormente, os parâmetros de transformação (alinhamento local) são estimados usando o modelo de transformação proposto. Finalmente, o mosaico digital é automaticamente gerado. A seguir serão detalhadas as etapas do método proposto.

3.2.1 Pré-processamento dos dados

Dado um par de imagens $I(x, y)$ e $I'(x, y)$, como apresentado na Figura 11, a primeira etapa do método proposto neste trabalho consiste em definir janelas de recorte, J_i para a imagem de referência $I(x, y)$ e J_j para a imagem de pesquisa $I'(x, y)$. Em seguida, linhas retas são extraídas em J_i e J_j empregando uma ferramenta de detecção e extração de linhas retas. O algoritmo implementado segue a seguinte sequência de etapas: A) Suavização da imagem usando o filtro mediana; B) Segmentação da imagem através do operador Sobel e limiarização por OTSU; e C) Afinamento de bordas por supressão não-máxima. A Figura 11 mostra a arquitetura da etapa de pré-processamento dos pares de imagens.

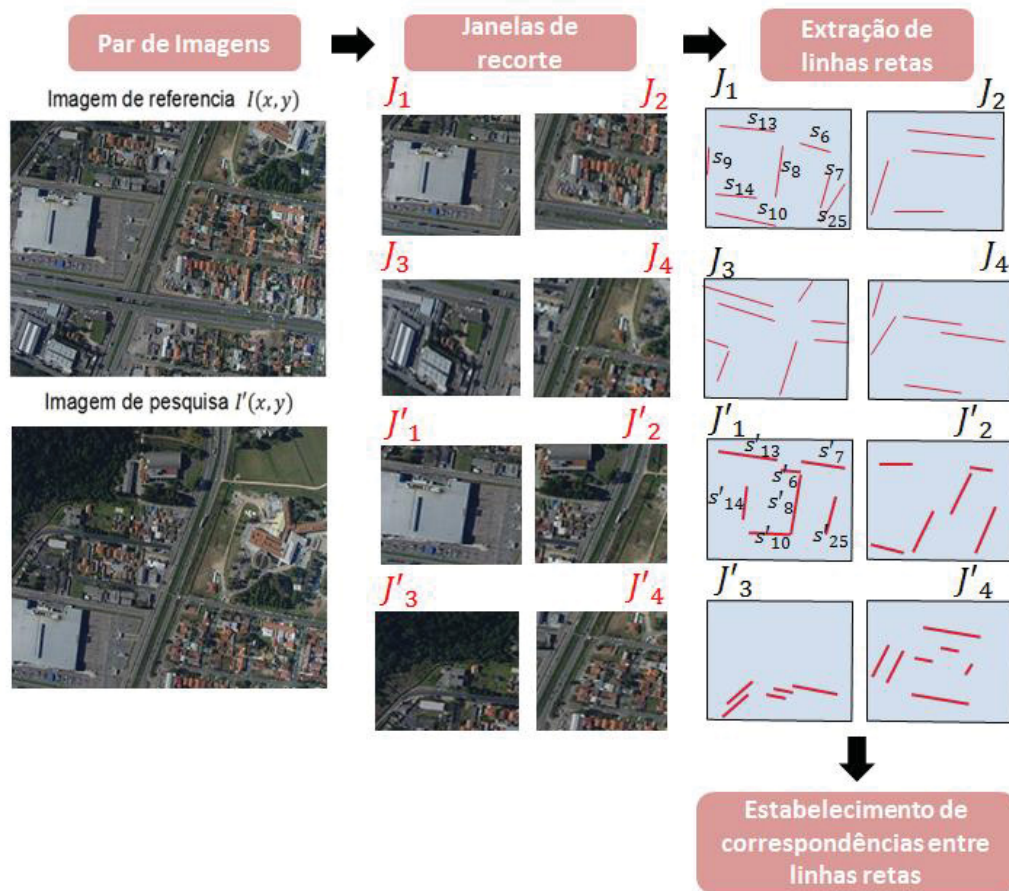
Para cada janela de recorte J_i e J_j é obtido um agrupamento ordenado de linhas retas (l_i, l'_j) , sendo l_i o agrupamento de linhas retas extraídas em J_i e l'_j o agrupamento de linhas retas extraídas em J_j , ambos no sistema referencial digital:

$$l_i = \{s_1, s_2, \dots, s_M\} \quad (24)$$

$$l'_j = \{s'_1, s'_2, \dots, s'_N\} \quad (25)$$

sendo, s_M e s'_N a i -ésima linha reta em J_i e J_j , respectivamente para $M > N$.

FIGURA 11 - ETAPAS DO PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS



FONTE: O autor, (2017).

Na Figura 11, considere que as correspondências entre o agrupamento de linhas retas $l_1 = \{s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{13}, s_{14}, s_{25}\}$ presente na janela de recorte J_1 e o agrupamento $l'_1 = \{s'_6, s'_7, s'_8, s'_9, s'_{10}, s'_{13}, s'_{14}, s'_{25}\}$ contido na janela de recorte J'_1 foram manualmente estabelecidas. Vale ressaltar que somente os valores do ponto entre as extremidades das linhas retas de l_1 ($p_i = [x, y]^T$) e os parâmetros a, b, c de cada linha reta de l'_1 correspondente são armazenados. Todo o procedimento descrito anteriormente é aplicado para todos os agrupamentos extraídos nas janelas de pesquisas ($J_2, J_3, J_4, J'_2, J'_3, J'_4$). O resultado é um conjunto de pares de linhas retas correspondentes.

Para alinhar localmente um par de imagens digitais é necessário estimar os parâmetros de transformação que descreve uma rotação, duas translações e um fator de escala uniforme entre as imagens.

3.2.2 Alinhamento local de pares de imagens digitais

Neste trabalho é proposta uma transformação matemática que mapeia cada ponto $p = [x, y]^T$ entre as extremidades da linha reta extraída na imagem de referência numa linha reta $l = [a, b, c]^T$ correspondente na imagem de pesquisa para estimativa dos parâmetros de transformação.

O simples deslocamento da origem da imagem I para uma nova imagem I' é considerada uma transformação matemática. Essa transformação pode ser escrita como uma função vetorial dada na forma (Hartley e Zisserman, 2000):

$$I' = f(I), f: \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2 \quad (26)$$

Uma transformação afim é uma transformação geométrica que preserva colinearidade entre os pontos e a razão de distância entre eles. Basicamente, uma transformação afim descreve dois fatores de escala (μ_x, μ_y) , uma rotação (θ) , duas translações (t_x, t_y) e um fator de não ortogonalidade (δ) .

De forma geral, uma matriz de transformação H pode ser construída por uma sequência de transformações afim, desde que as operações matriciais sejam realizadas por meio de coordenadas homogêneas. Por exemplo, considere três matrizes de transformação T_1 (translação), T_2 (fator de escala) e T_3 (rotação):

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Neste caso, a matriz H pode ser obtida multiplicando T_1 , T_2 e T_3 na seguinte ordem, a saber:

$$H = T_3 T_2 T_1 = \begin{bmatrix} \mu_x \cos\theta & \mu_y \sin\theta & [\mu_x(t_x \cos\theta) + \mu_y(t_y \sin\theta)] \\ -\mu_x \sin\theta & \mu_y \cos\theta & [\mu_y(t_y \cos\theta) - \mu_x(t_x \sin\theta)] \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Seja um ponto $p = [x, y, 1]^T$, em coordenadas homogêneas, pertencente à linha reta $l = [a, b, c]^T$, uma vez que $ax + by + c = 0$. Esta relação pode ser escrita em termos do produto interno entre vetores, como segue:

$$(x, y, 1)^T \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = p^T l = 0 \quad (29)$$

sendo a , b e c os parâmetros de l .

Introduzindo a matriz H na Equação (29) resulta o modelo de transformação matemática proposto neste trabalho, como segue:

$$p^T H l = 0 \quad (30)$$

$$(x, y, 1)^T \begin{bmatrix} \mu_x \cos \theta & \mu_y \sin \theta & [\mu_x(t_x \cos \theta) + \mu_y(t_y \sin \theta)] \\ -\mu_x \sin \theta & \mu_y \cos \theta & [\mu_y(t_y \cos \theta) - \mu_x(t_x \sin \theta)] \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = 0 \quad (31)$$

A partir da Equação (31) a matriz H é determinada em função de um ponto $p = [x, y, 1]^T$ entre as extremidades da linha reta extraída em $I(x, y)$ e uma linha reta $l = [a, b, c]^T$ correspondente em $I'(x, y)$. Como o modelo matemático proposto é não linear e as observações e os parâmetros atendem uma injunção de condição, a solução do problema é feito através do modelo combinado do MMQ.

De acordo com Mikhail e Ackerman (1976) o método combinado é aplicado em modelos funcionais que ajustam observações e parâmetros. Os modelos funcionais aplicados a este método são formados por equações implícitas do tipo:

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (32)$$

O método combinado de ajustamento não-linear é obtido através da linearização utilizando a expansão em série de Taylor, tomando-se apenas os dois primeiros termos da série, assim:

$$AX + BV + W = 0 \quad (33)$$

sendo $A = \frac{\partial F}{\partial X_a} |_{X_0, L_b}$, $B = \frac{\partial F}{\partial L_a} |_{X_0, L_b}$, $W = F(X_0, L_b)$, $X = X_a - X_0$, $V = L_a - L_b$, X_0 é o vetor dos parâmetros aproximados, X_a é o vetor dos parâmetros ajustados L_b é o vetor onde são inseridos as observação e L_a é o vetor das observações ajustadas.

Assim sendo tem-se a seguinte solução para as equações normais.

$$X = [A^T(BPB^T)^{-1}A]^{-1}A^T(BPB^T)^{-1}W \quad (34)$$

Desde que os parâmetros de transformação são estimados pelo MMQ o processo de mosaicagem para cada par de imagens digitais é realizado.

3.2.3 Mosaicagem de imagens digitais

Para a mosaicagem de imagens digitais, os valores estimados de escala (μ_x, μ_y) , rotação (θ) e translação (t_x, t_y) são introduzidos em uma matriz de construção (Q) , como segue:

$$Q = \begin{bmatrix} r_x & q_x & f_x \\ -q_y & r_y & f_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

sendo $r_x = \mu_x \cos \theta$, $r_y = \mu_y \cos \theta$, $q_x = \mu_x \sin \theta$, $q_y = \mu_y \sin \theta$, $f_x = \mu_x(t_x \cos \theta) + \mu_y(t_y \sin \theta)$, $f_y = \mu_y(t_y \cos \theta) - \mu_x(t_x \sin \theta)$.

Seja $X = [x \ y \ 1]^T$ um ponto qualquer na origem de pesquisa aplicando a matriz Q o ponto X será transformado para $X' = [x' \ y' \ 1]^T$ na imagem de referência, como segue:

$$X' = Q \cdot X \quad (36)$$

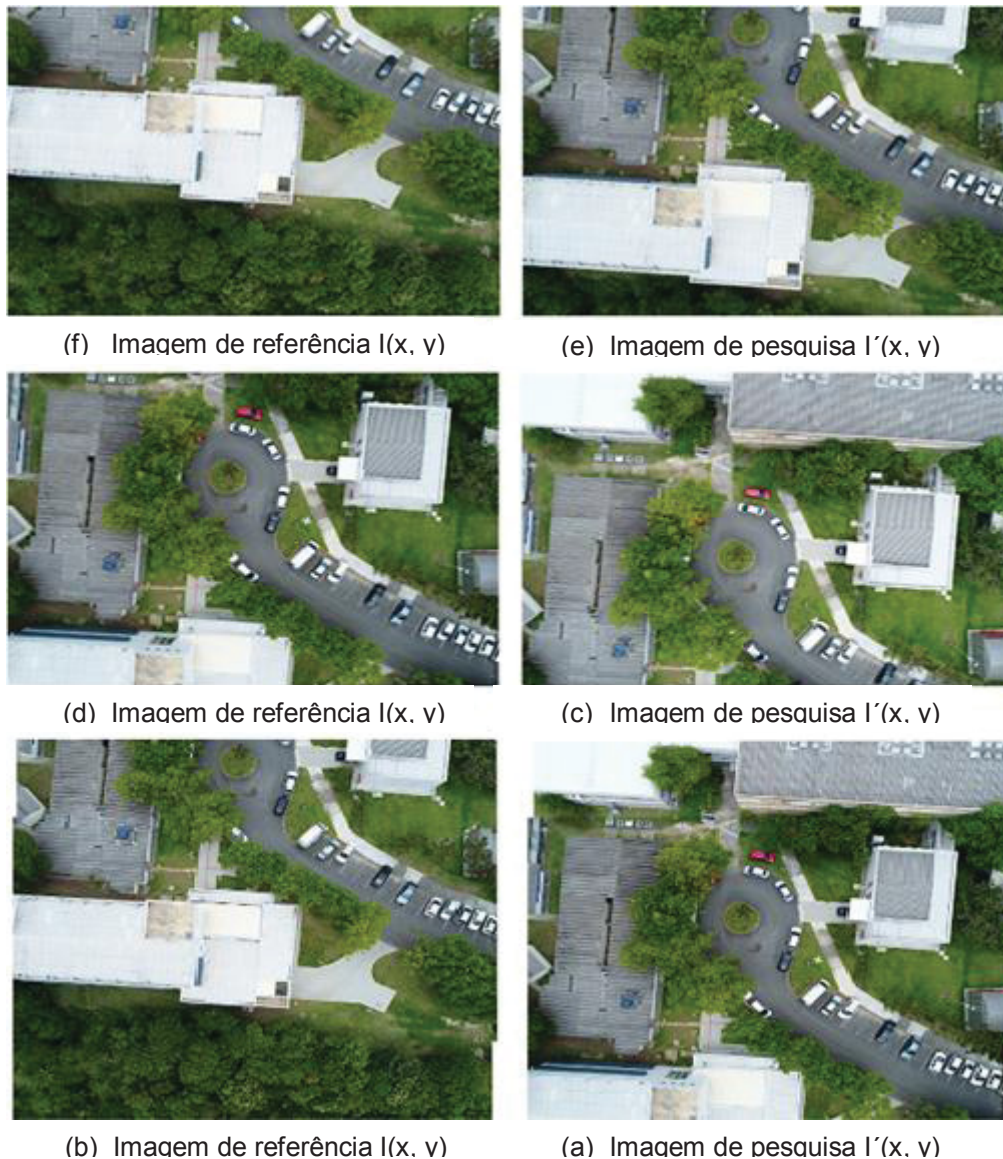
Aplicando a Equação (36) para todos os pontos da imagem de pesquisa o mosaico será construído. No entanto, como os valores de pixel são diferentes de cada imagem é necessário aplicar uma interpolação bilinear. O resultado é um mosaico

com uma transformação geométrica coincidente de feições entre as imagens. A seguir serão apresentados os experimentos e a discussão dos resultados.

4 EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar o potencial do modelo matemático proposto, neste trabalho, foram realizados quatro cenários usando imagens digitais coletadas por uma câmera digital de pequeno formato modelo Sony Nex-6 embarcada em um RPA profissional multirrotor (6 hélices) da marca DJI, modelo *Spreading Wings S800*. As imagens cobrem uma determinada área de teste do centro politécnico da UFPR. Os pares de imagens foram tomados com uma sobreposição longitudinal de 70% e lateral 60%.

FIGURA 12 - PARES DE IMAGENS DO CENÁRIO I. (a) (c) (e) IMAGENS DE REFERÊNCIA PARA OS EXPERIMENTOS 1, 2 E 3. ; (b) (d) (f) IMAGENS DE PESQUISA PARA OS EXPERIMENTOS 1, 2 E 3



FONTE: O autor (2018).

Como mostrado na Figura 12, o primeiro cenário de experimentos contém três pares de imagens digitais, que são compostas por edificações altas e baixas, arruamento, vegetação, faixas de trânsito, automóveis, entre outras.

Como descrito anteriormente, linhas retas são extraídas usando o algoritmo implementado e suas correspondências são manualmente estabelecidas. Os pontos entre as extremidades (x_m, y_m) das linhas retas são extraídos na imagem de referência manualmente, enquanto na imagem de pesquisa os parâmetros a, b, c de cada linha reta correspondente são determinados usando as Equações (22) e (23). A Tabela 2 mostra as coordenadas dos pontos médios e os parâmetros das linhas retas correspondentes coletadas nas imagens de referência e de pesquisa.

TABELA 2 - COORDENADAS DOS PONTOS E OS PARÂMETROS DAS LINHAS RETAS CORRESPONDENTES COLETADAS NAS IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA

CENÁRIO I									
EXPERIMENTOS	IMAGEM DE REFERÊNCIA		IMAGEM DE PESQUISA						
	Ponto médio das linhas retas (pixels)		Pontos iniciais e finais das linhas retas (pixels)				Parâmetros das linhas retas		
	x_m	y_m	x_i	y_i	x_f	y_f	a	b	c
1°	1892	883	1796	1833	1808	1587	-246	-12	463812
	716	1945	18	2805	1202	2913	108	-1184	3319176
	3159	2335	2780	3117	3393	3153	36	-613	1810541
	3887	2353	3717	3273	3837	3039	-234	-120	1262538
	3645	631	3423	1329	3687	1515	186	264	-285822
	1682	781	1442	1563	1808	1575	12	-366	554754
2°	152	1671	8	2493	194	2715	222	-186	461922
	1580	2511	1370	3441	1712	3453	12	-342	1160382
	2876	831	2761	1611	2882	1905	294	-121	-616803
	166	1095	3428	1972	3423	2205	233	5	-808584
	322	405	3531	1383	4023	1413	30	-522	615996
	532	2307	4581	3111	4595	3495	384	-5	-1743549
3°	160	2568	171	607	345	823	216	-174	68682
	1588	3426	1503	1591	1857	1591	0	-354	563214
	3268	2748	3297	757	3399	1033	276	-102	-832758
	3514	3252	3489	1339	3729	1525	186	-240	-327594
	4306	2166	4413	31	4383	457	426	-30	-1880868
	2836	4452	2943	2119	2907	2713	594	-36	-1824426

FONTE: O autor (2018).

Os dados apresentados na Tabela 2 foram usados no modelo matemático proposto (Eq. 31) e os parâmetros de transformação $(\mu_x, \mu_y, \theta, t_x, t_y)$ estimados pelo MMQ usando o modelo matemático ponto-a-reta proposto neste trabalho. A Tabela 3 mostra os parâmetros de transformação estimados com o modelo proposto.

TABELA 3 - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ESTIMADOS PELO MODELO PROPOSTO

PARÂMETROS	VALORES INICIAIS	EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2	EXPERIMENTO 3
		Valores estimados	Valores estimados	Valores estimados
θ (rad.)	0.05	-0.0487	0.0135	0.0025
t_x (pixel)	0	45.3923	60.4233	-86.6924
t_y (pixel)	0	-939.3526	-933.0041	1854
μ_x	1	1	1	1
μ_y	1	1	1	1

FONTE: O autor (2018).

Como pode ser observado na Tabela 3, os parâmetros de translação (t_x, t_y) estimados pelo método proposto através dos experimento 1, 2 e 3 (a diante designado por $E1$, $E2$ e $E3$) mostram os movimentos gerais de cada experimento que deve ser $E1(45.3923, -939.3526)$, $E2(60.4233, -933.0041)$ e $E3(-86.6924, 1854)$ respetivamente; quanto a fatores de escala (μ_x, μ_y) estimados, são iguais a 1 para todos os experimentos, indicam que não houve mudanças de escalas das imagens. Em relação aos valores de rotação (θ) estimados $E1(\theta = -0.0487 \text{ rad})$, $E2(\theta = 0.0135 \text{ rad})$ e $E3(\theta = 0.0025 \text{ rad})$, o valor inicial para todos experimento foi $\theta = 0.05 \text{ rad}$, podemos dizer que existe um certo ângulo de rotação das imagens em todos experimentos.

Aplicando os valores estimados com o modelo matemático proposto $(\theta, t_x, t_y, \mu_x \text{ e } \mu_y)$, na Equação (35), se tem resultado o mosaico digital para cada par de imagens digitais do Cenário I, como mostrado a Figura 13. Nas Figuras 13a e 13b é mostrado os mosaicos digitais obtidos com o método proposto usando os pares de imagens dos experimentos 1 e 2. Note que não há diferença radiométricas significativa em ambos os mosaicos digitais e também as inconsistências geométricas entre as linhas de junção das feições cartográficas, não são perceptíveis.

FIGURA 13 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO 1. (b) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO 2



(a)



(b)

FONTE: O autor (2018).

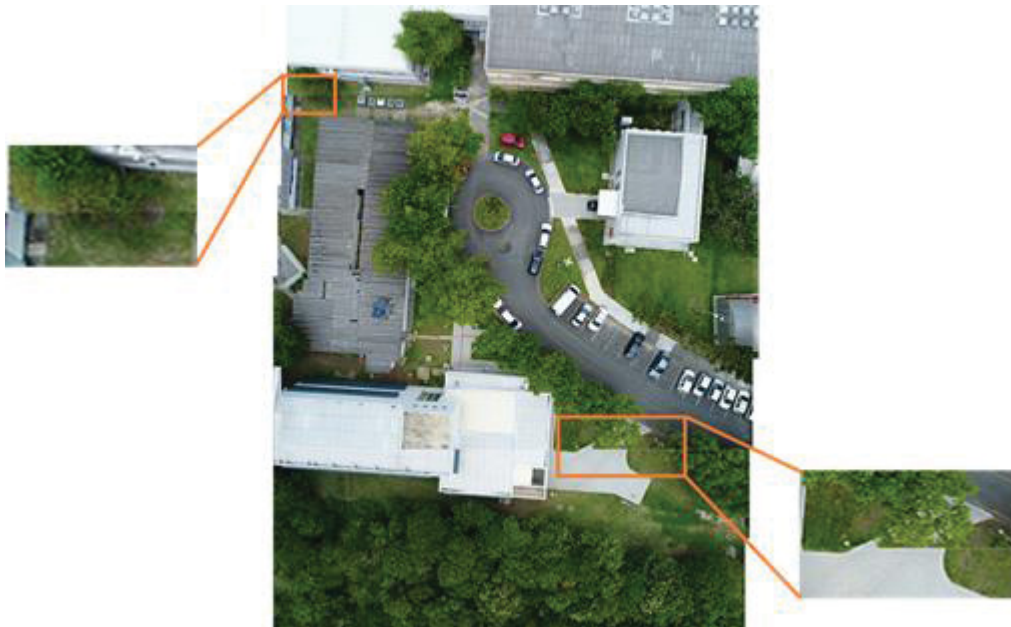
Já na Figura 14 é apresentado o mosaico digital produzido com as quatro imagens dos pares referentes aos experimentos 1 e 2. É possível perceber uma linha, no canto inferior direito, que separa geometricamente as feições cartográficas. Este efeito foi produzido pela falta da presença de linhas retas nesta região da imagem dificultando a estimativa dos parâmetros de transformação. No pré-processamento

foram coletadas seis linhas retas nas posições das bordas de objetos presentes em cada imagem de entrada.

FIGURA 14 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO 3. (b) RECORTE DO MOSAICO E AMPLIAÇÃO DAS REGIOES



(a)



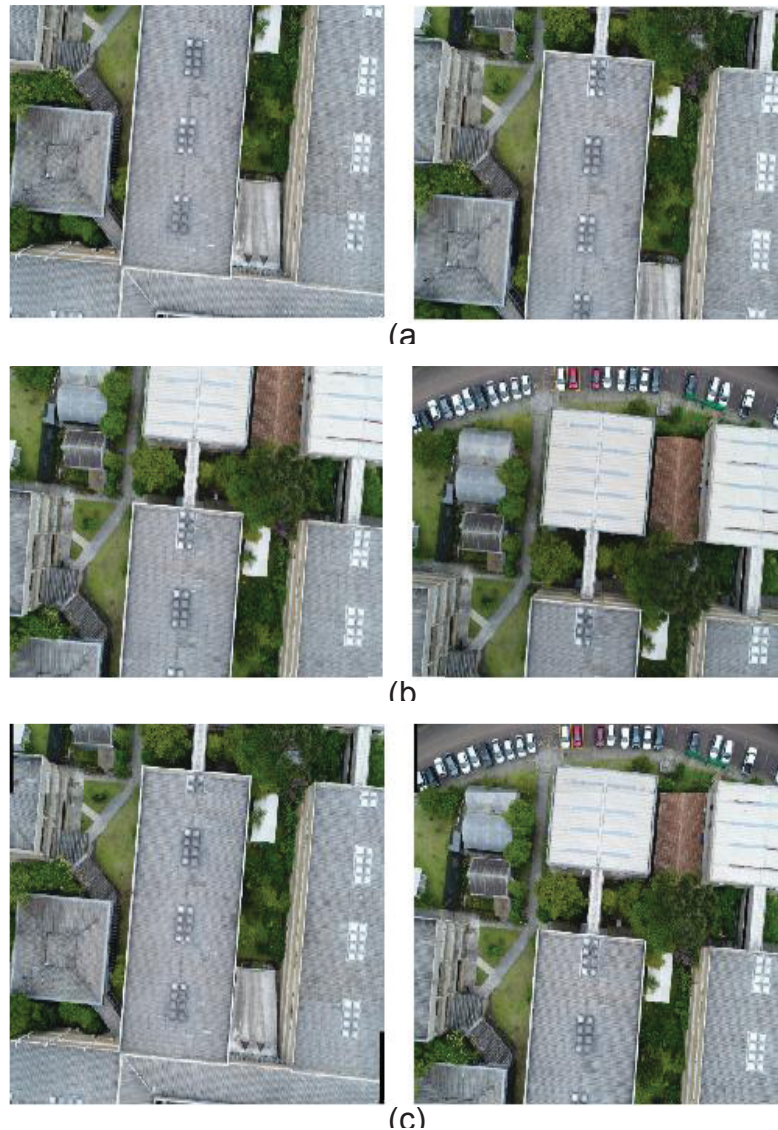
(b)

FONTE: O autor (2018).

As descontinuidades encontradas no mosaico também podem ser causadas pelas regiões com grandes alterações radiométricas devido à mudança de ponto de

vista do sensor e variação solar, bem como pelos erros na extração das linhas retas e no estabelecimento das correspondências. O mesmo procedimento descrito anteriormente foi adotado para os Cenários II e III. A Figura 15 mostra as imagens de referência e de pesquisa usadas nos experimentos do Cenário II.

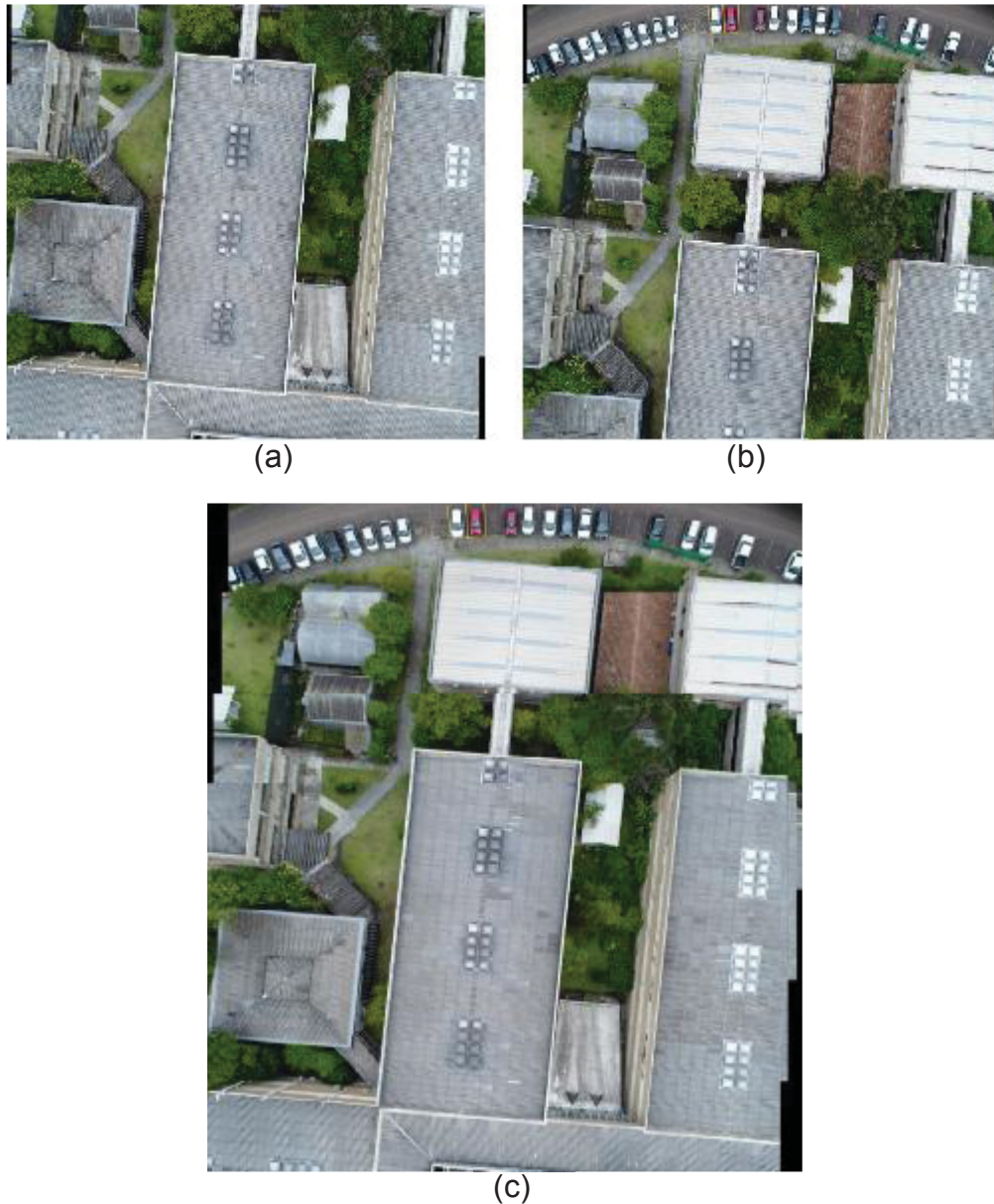
FIGURA 15 - PARES DE IMAGENS DO CENÁRIO II. (a) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 4. (b) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 5. (c) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 6



FONTE: O autor (2018).

A Figura 16 mostra os mosaicos digitais obtidos com o método proposto para cada experimento do Cenário II.

FIGURA 16 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 4. (b) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 5. (c) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 6

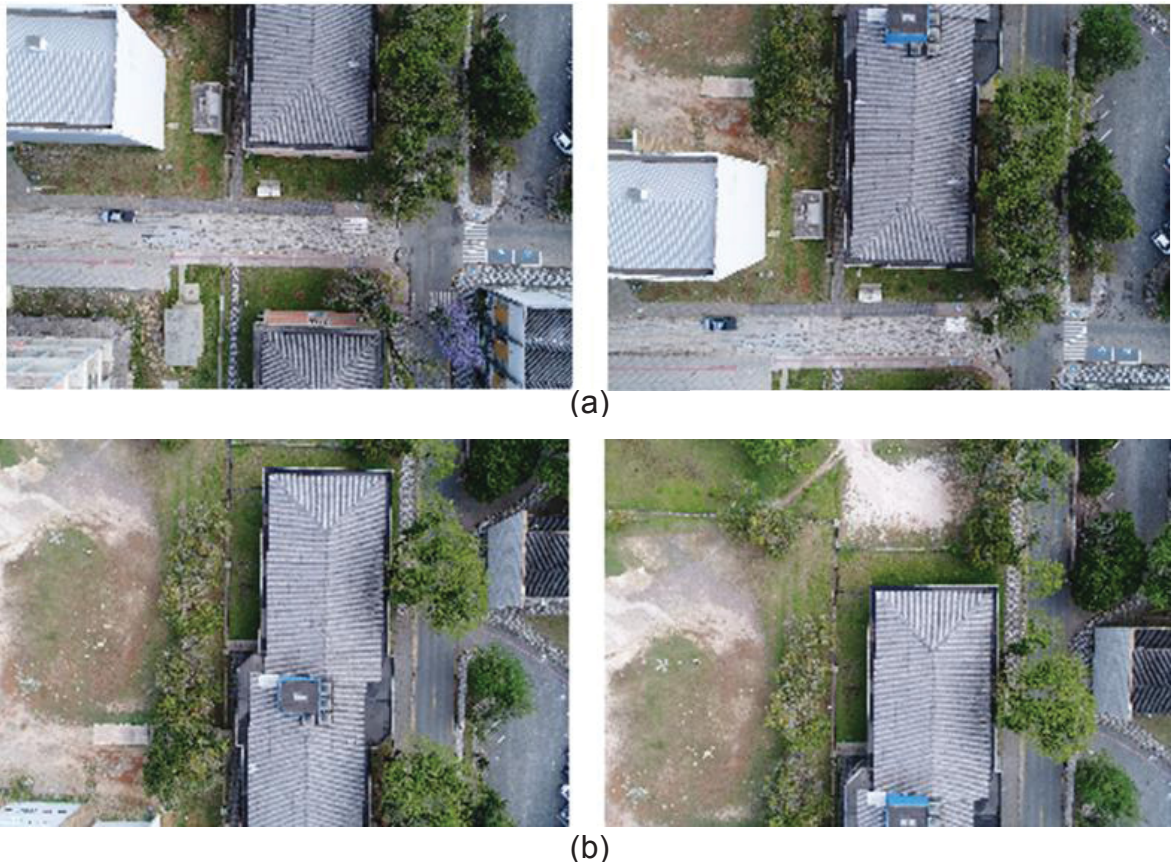


FONTE: O autor (2018).

A Figura 16 apresenta os mosaicos digitais produzidos com descontinuidades perceptíveis. As descontinuidades encontradas podem ser devidas aos erros na extração das linhas retas, no estabelecimento das correspondências e devido à mudança de ponto de vista do sensor, dado que há boa distribuição de linhas retas coletadas nas bordas de objetos presentes, como edifícios, calçadas e vias nas imagens de entrada. Estas descontinuidades são frequentes e visíveis em mosaicos

com mais de um par de imagens. A Figura 17 mostra as imagens de referência e de pesquisa usadas nos experimentos do Cenário III.

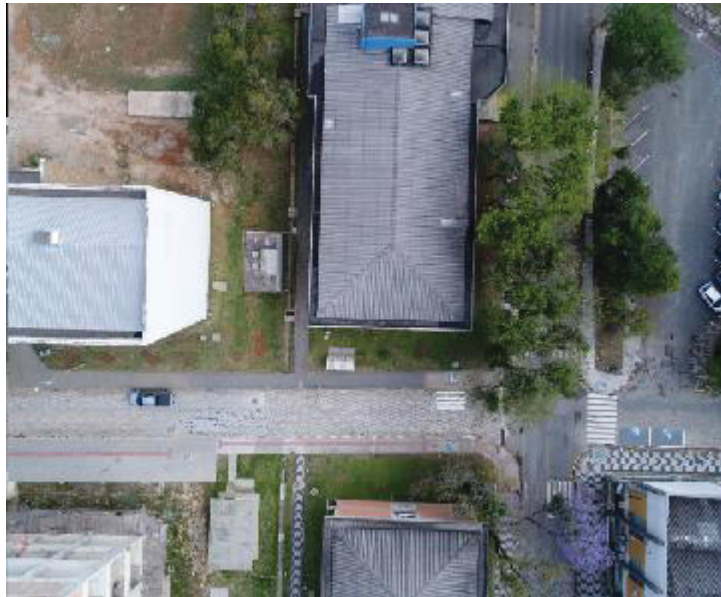
FIGURA 17 - PARES DE IMAGENS DO CENÁRIO III. (a) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 7. (b) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO 8



FONTE: O autor (2018).

A Figura 18 mostra os mosaicos digitais obtidos com o método proposto para cada experimento do Cenário III.

FIGURA 18 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 7. (b) MOSAICO DIGITAL REFERENTE A PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO 8



(a)



(b)

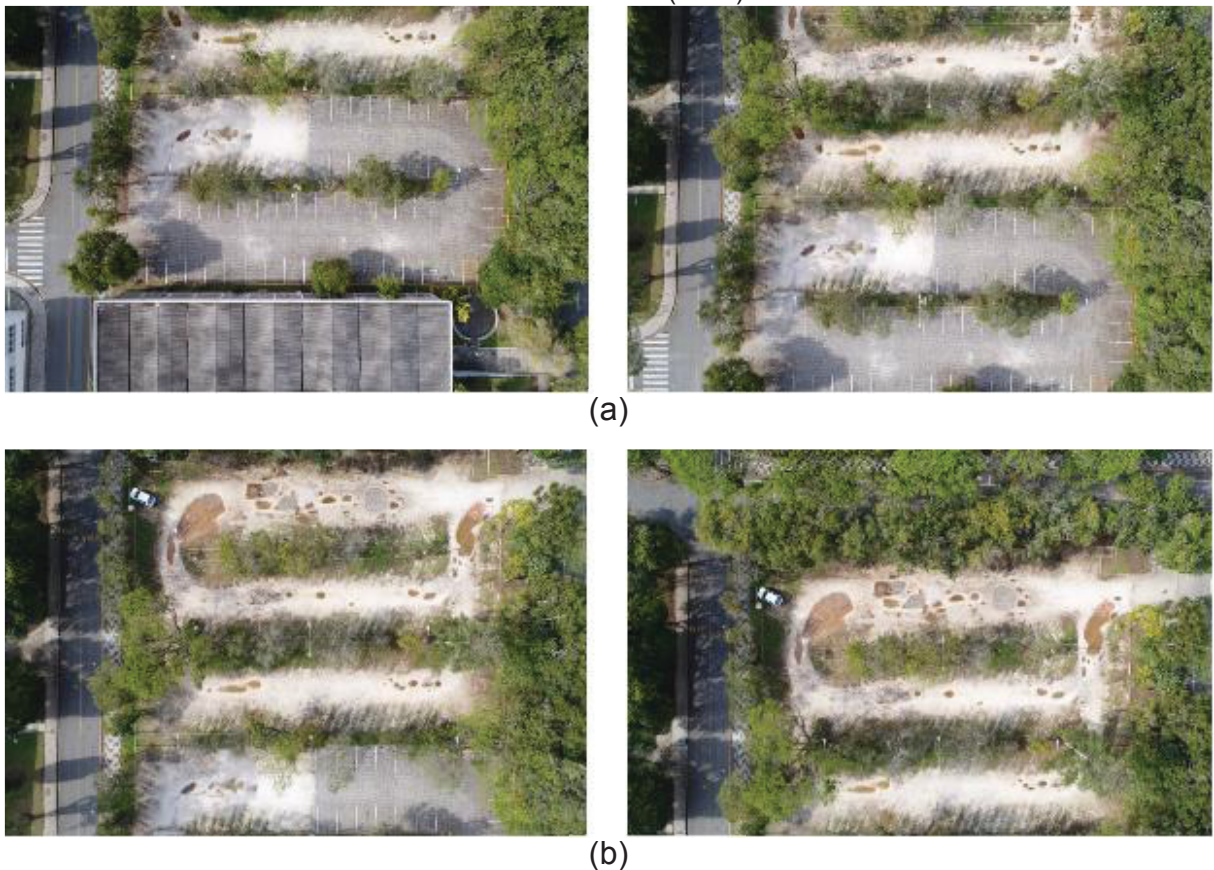
FONTE: O autor (2018).

Nas Figuras 18a e 18b é mostrado os mosaicos digitais obtidos com o método proposto usando os pares de imagens dos experimentos 7 e 8. Note que não há diferença radiométricas significativa em ambos os mosaicos digitais e também as inconsistências geométricas entre as linhas de junção das feições cartográficas, não são perceptíveis.

Avaliando os resultados obtidos por meio de análises visual e comparativo através de parâmetros de transformação de matriz de construção, tomando como referência o método direto baseado em modelo ponto-a-ponto (método convencional) para geração de mosaicos digitais desenvolvido por Stegmann (2001), foram usadas imagens de referências e de pesquisas não ajustadas radiometricamente, mostradas nas figuras 19.

FIGURA 19 - PARES DE IMAGENS. (a) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1. (b) IMAGENS DE REFERÊNCIA E DE PESQUISA PARA O EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2

FONTE: O autor (2018).



A Figura 20, mostra os mosaicos construídos por modelo de Stegmann. A Figura 20c mostra o recorte do mosaico e ampliação das regiões da Figura 20b do experimento de avaliação 2, visualmente nota-se uma diferença radiométrica significativa e com descontinuidades acentuada em mosaico digital.

FIGURA 20 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO DE STEGMANAN. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1. (b) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2. (c) RECORTE DO MOSAICO E AMPLIAÇÃO DAS REGIÕES DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2.



FONTE: O autor (2018).

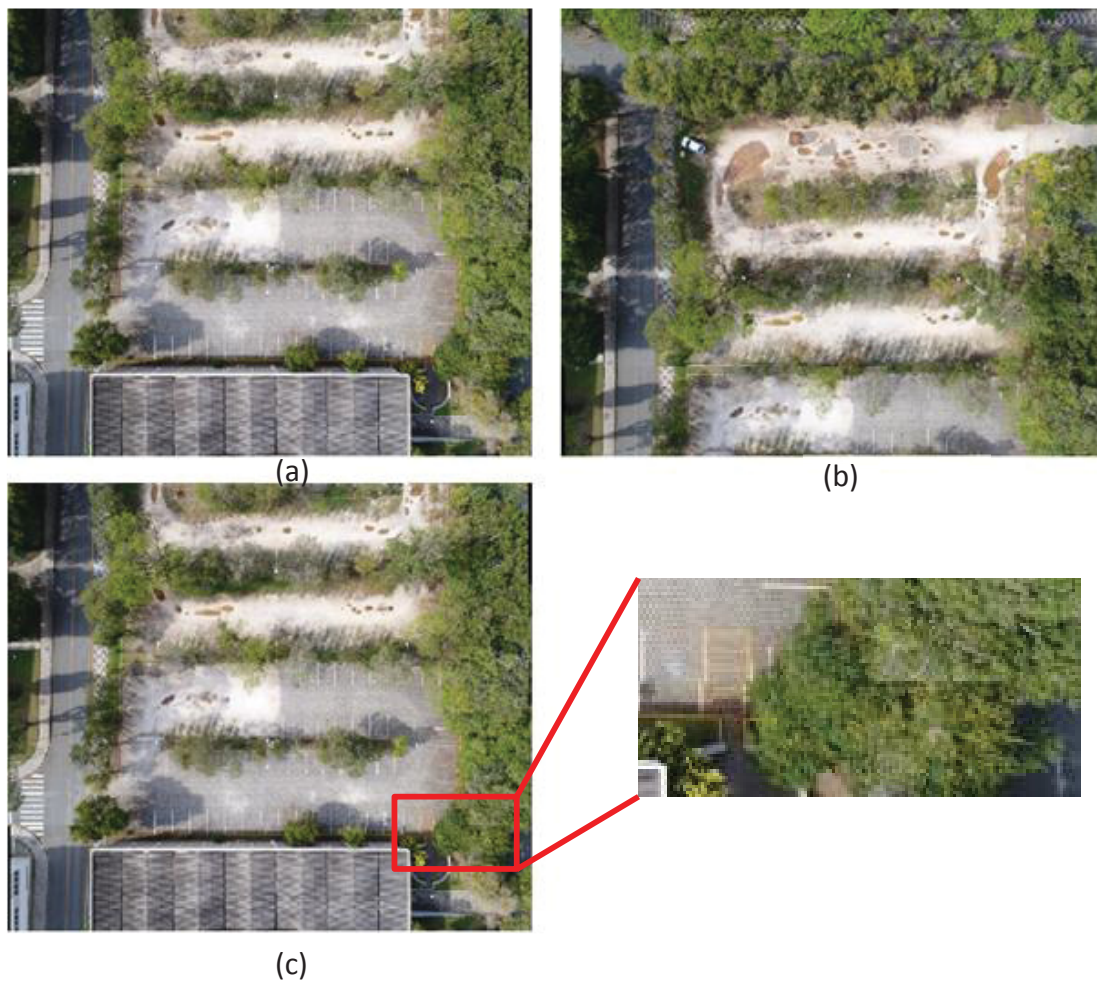
Analisando os mosaicos das figuras 20a e 20b com tamanhos das ambas imagens 90x60, sob forma da matriz de construção C_{20a} (referente à figura 20a) e C_{20b} (referente à figura 20b), tem-se:

$$C_{20a} = \begin{pmatrix} 0.9750 & -0.0057 & 4.3318 \\ 0.0057 & 0.9750 & -1053.8 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_{20b} = \begin{pmatrix} 0.9946 & -0.0239 & 27.1568 \\ 0.0239 & 0.9946 & -942.2742 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Observe a matriz de construção $C_{20a}(1,3)$ e $C_{20a}(2,3)$ estimamos que o movimento geral deve ser $(4.3318, -105308)$; quando $C_{20a}(1,1)$ e $C_{20a}(2,2)$ não são iguais a 1, indicam as mudanças de escalas das imagens; o mesmo acontece com a matriz de transformação C_{20b} . Já os mosaicos obtidos com o modelo proposto, usando imagens da Figura 20 com tamanho 90×60 , são mostrados na Figura 21.

FIGURA 21 - MOSAICOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO PROPOSTO. (a) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1. (b) MOSAICO DIGITAL DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 2. (c) RECORTE DO MOSAICO E AMPLIAÇÃO DAS REGIÕES DO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO 1.



FONTE: O autor (2018).

A Figura 21c, mostra o recorte do mosaico e ampliação das regiões do experimento de avaliação 2 da Figura 21b, visualmente com diferença radiométricas um pouco perceptíveis em mosaico digital e também as inconsistências geométricas entre as linhas de junção das feições cartográficas, não são perceptíveis.

A matriz de Construção (Equação 35) Q_{21a} (referente à figura 21a) e Q_{21b} (referente à figura 21b), tem-se:

$$Q_{21a} = \begin{pmatrix} 1 & 0.00018150 & 37.8044 \\ -0.00018150 & 1 & 1112.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Q_{21b} = \begin{pmatrix} 1 & 0.000083770 & 39.6313 \\ -0.000083770 & 1 & 919.3531 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Observe a matriz de transformação $Q_{21a}(1,3)$ e $Q_{21a}(2,3)$ estimamos que o movimento geral deve ser (37.8044, 1112.5); quando $Q_{21a}(1,1)$ e $Q_{21a}(2,2)$ são iguais a 1, indicam que não houve mudanças de escalas das imagens; o mesmo acontece com a matriz de transformação Q_{21b} .

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou um modelo para mosaicagem de imagens digitais. O modelo proposto é baseado em uma abordagem ponto-a-reta e tem as principais características: definir janelas de recorte para a imagem de referência e para a imagem de pesquisa e extração de linhas retas em pares de imagens digitais, usando as ferramentas desenvolvidas, e estabelecimento de correspondência entre o agrupamento de linhas retas, contidas em cada janela de recorte; desenvolvimento de um modelo matemático para estimativa dos parâmetros de transformação entre pares de imagens e geração do mosaico de imagens digitais.

A detecção e extração de linhas retas usando as ferramentas desenvolvidas apresentou-se eficiente, praticamente foram extraídas apenas as linhas retas das bordas de objetos presentes nas imagens de referências, assim como nas imagens de pesquisa, fazendo com que o estabelecimento de correspondência entre o agrupamento de linhas retas contidas em cada janela de recorte seja precisa. Uma vez que apenas cada ponto médio p da linha reta extraída na imagem de referência é associado a uma linha reta l correspondente na imagem de pesquisa e a estimação dos parâmetros de transformação realizada a partir do método combinado, a etapa de correspondência entre primitivas tornou-se computacionalmente mais rápida do que uma abordagem ponto a ponto.

A técnica proposta para a estimativa dos parâmetros é bastante simples, uma vez que emprega funções lineares e permite que as observações possam ser ajustadas simultaneamente, proporcionando melhor precisão no ajustamento das observações. Na última etapa, a de mosaicagem de imagens digitais, para além da matriz de construção (Q), foi utilizada a técnica de interpolação bilinear. O resultado é um mosaico com uma transformação geométrica coincidente de feições entre as imagens digitais, apresentando uma melhoria significativa na construção de mosaicos. De modo geral, o método proposto apresenta algumas vantagens: o uso de linhas retas no processo de estabelecimento de correspondências e de fácil extração em imagens digitais, devido estar presentes em ambientes antropizados; maior consistência geométrica sem descontinuidade aparente; de simples e rápida computação.

A critério de Comparação, o método proposto (ponto-a-reta) com o método convencional (ponto-a-ponto), nota-se uma diferença geométrica e radiométrica em

relação ao mosaico. No primeiro, o resultado é um mosaico com uma transformação geométrica consistente e coincidente de feições entre as imagens digitais e com diferença radiométricas obtida pouco perceptíveis em imagens digitais sem vegetação. Em Stegmann (2001), o mosaico apresenta uma transformação geométrica não consistente de feições entre as imagens digitais e com diferença radiométricas obtida um pouco mais perceptíveis em imagens digitais.

A detecção e extração de linhas retas é uma tarefa complexa e exige maiores investigações, uma vez que elas afetam a estimativa dos parâmetros de transformação e, conseqüentemente o alinhamento de imagens. Para a extração de linhas retas e estabelecimento de correspondências, em trabalhos futuros recomenda-se empregar modelos mais acurados e processos automatizados. Também é recomendado, para trabalhos futuros, investigações sobre o refinamento dos parâmetros de transformação e avaliar um método de alinhamento para produzir mosaicos de imagens digitais globalmente consistente, além da inclusão de processos para a calibração radiométricas das imagens digitais.

REFERÊNCIAS

- ALI S., DAUL C., GALBRUN E., GUILLEMIN, **Anisotropic motion estimation on edge preserving Riesz wavelets for robust video mosaicking**, Pattern Recognit. 51 (2016) 425–442.
- ARRUDA JÚNIOR, Elias Ribeiro de. **Mosaicagem de imagens digitais**. 2002.
- ARTERO, Almir Olivette. **Técnicas para extração automática de feições retas em imagens digitais**. Presidente Prudente, 1999.
- BERBERIDIS, Kostas; KARYBALI, Irene. **A new efficient cross-correlation based image registration technique with improved performance**. In: Signal Processing Conference, 2002 11th European. IEEE, 2002. p. 1-4.
- CHO, SooHyun; CHUNG, YunKoo; LEE, Jaeyeon. **Automatic Image Mosaic System Using Image Feature Detection and Taylor Series**. In: DICTA. 2003. p. 549-560.
- DAL POZ, A.P.; TOMMASELLI, A.M.G.; CINTRA, J.P., **Relational Matching Applied to Automatic Extraction of Ground Control in Digital Images**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, Austria, 1996, pp. 131-134.
- ELIBOL, Armagan; GRACIAS, Nuno; GARCIA, Rafael. **Fast topology estimation for image mosaicing using adaptive information thresholding**. Robotics and Autonomous systems, 2013, 61.2: 125-136.
- GALO, Maurizio; TOZZI, Clésio L. **Feature-point based matching: a sequential approach based on relaxation labeling and relative orientation**. 2004.
- GAO, Guandong; JIA, Kebin. **A new image mosaics algorithm based on feature points matching**. In: Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC'07. Second International Conference on. IEEE, 2007. p. 471-471.
- GHANNAM, Sherin; ABBOTT, A. Lynn. Cross correlation versus mutual information for image mosaicing. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 2013.
- Gonzalez, R. C., Woods, R.E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2000.
- HASEGAWA, J. K.; JUNIOR, E. R. A. **Mosaico com imagens digitais**. Boletim de Ciências Geodésicas, 2004, 10.1.
- ISLAM, Md Baharul; KABIR, Mir Md Jahangir. **A new feature-based image registration algorithm**. Computer Technology and Application, 2013, 4.2.

- LI, MING; LI, D.; FAN, D. **A study on automatic UAV image mosaic method for paroxysmal disaster**. In: Proceedings of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress, Melbourne, Australia. 2012. p. 123-128.
- LOWE, David G. **Distinctive image features from scale-invariant keypoints**. International journal of computer vision, 2004, 60.2: 91-110.
- MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. **Observations and least squares**, New York, IAP. Dun-Donneley Pub, 1976.
- MARQUES FILHO, Ogê; NETO, Hugo Vieira. **Processamento digital de imagens**. Brasport, 1999.
- NEMRA, Abdelkrim; AOUF, Nabil. **Robust invariant automatic image mosaicing and super resolution for UAV mapping**. In: Mechatronics and its Applications, 2009. ISMA'09. 6th International Symposium on. IEEE, 2009. p. 1-7.
- PATIDAR, Ms Durga; JAIN, Akshay. **Automatic image mosaicing: an approach based on FFT**. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2011, 1.1: 01-04.
- HARTLEY, R. I. and ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. Cambridge University Press, ISBN: 0521623049, 2000.
- SAHOO, Prasanna K.; SOLTANI, S. A. K. C.; WONG, Andrew KC. **A survey of thresholding techniques**. Computer vision, graphics, and image processing, 1988, 41.2: 233-260.
- SCHENK, Toni. Digital photogrammetry: Vol. I: **Background, fundamentals, automatic orientation produceres**. TerraScience, 1999.
- STEGMANN, M. B., **Image warping**, Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Dinmark, 2001.
- TIAN, Gui Yun; GLEDHILL, Duke; TAYLOR, David. **Comprehensive interest points based imaging mosaic**. Pattern Recognition Letters, 2003, 24.9-10: 1171-1179.
- TIAN, Yumin; SUN, Aifeng; WANG, Di. **Seam-line determination via minimal connected area searching and minimum spanning tree for UAV image mosaicking**. International Journal of Remote Sensing, 2018, 1-15.
- VENKATESWAR, V.; CHELLAPPA, Rama. **Extraction of straight lines in aerial images**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14.11: 1111-1114.
- XIA, Menghan, et al. **Globally consistent alignment for planar mosaicking via topology analysis**. Pattern Recognition, 2017, 66: 239-252.

XIAO, Jiangjian; ZHANG, Yunjun; SHAH, Mubarak. **Adaptive region-based video registration**. In: Application of Computer Vision, 2005. WACV/MOTIONS'05 Volume 1. Seventh IEEE Workshops on. IEEE, 2005. p. 215-220.

XING, CHENG; WANG, JINLING; XU, YAMING. **A robust method for mosaicking sequence images obtained from UAV**. In: Information Engineering and Computer Science (ICIECS), 2010 2nd International Conference on. IEEE, 2010. p. 1-4.